

# KSLV-I의 기술적 안전 관리

조상연\* · 김용욱\* · 이정호\* · 신명호\*\* · 오승협\*

## Technical Safety Management for KSLV-I

Sang Yeon Cho\* · Yong Wook Kim\* · Jeong Ho Lee\* · Myoung Ho Shin\*\* ·  
Seung Hyub Oh\*\*

### ABSTRACT

KSLV-I is the 1st Korean satellite launch vehicle, which was launched at Naro space center by Korea Aerospace Research Institute (KARI) in AUG. 2009, and JUN. 2010. Although the missions of 1st and 2nd launch of KSLV-I were not successful, safety of launch vehicle was accomplished through the cooperation with the Russian partner Khunichev Space Research and Production Center (KhSC). Both parties co-developed the technical safety management program to ensure launch safety. In this paper, the analysis and contents of safety program are illustrated.

### 초 록

KSLV-I 나로호는 대한민국 최초의 위성발사체로 러시아와 공동개발 되었다. 2009년 8월과 2010년 6월에 있었던 1, 2차 발사는 위성을 궤도로 올리려는 목표 달성에는 실패하였지만 발사를 안전 관점에서 보았을 때는 인명이나 시설 손상과 같은 사고 없이 안전하게 이루어졌다. 안전한 발사를 이루기 위하여 우주발사체 사업단은 러시아의 카운터파트인 흐루니체프사와의 협력을 통해 발사체의 기술적 안전 프로그램을 개발한 바 있다. 본 논문에서는 KSLV-I에 적용된 기술적 안전 관리 프로그램을 소개하고자 한다.

Key Words: KSLV-I, 우주발사체 (Space Launch Vehicle), Technical Safety (기술적 안전), SAP (안전보증계획), 비정상/비상 상황 분석 (AS/ES)

### 1. 서 론

KSLV-I 나로호는 대한민국 최초의 위성발사체로 1단은 발사체 개발 경험이 풍부한 러시아의

흐루니체프사에서 담당하고 2단과 PLF, 위성의 개발은 한국의 항공우주연구원이 담당하는 국제적 프로젝트 형태로 개발되었다. KSLV-I 나로호는 나로우주센터에서 2009년 8월 25일과 2010년 6월 10일에 2회 발사되었다. 나로호의 임무는 100kg 급의 과학 위성을 지구 저궤도에 쏘아 올리는 것으로 2회의 발사가 모두 임무의 달성에 실패하였다. 현재 항공우주연구원과 흐루니체프

\* 한국항공우주연구원 추진기관체팀

\*\* 한국항공우주연구원 체계종합팀  
연락처, E-mail: chosangy@kari.re.kr

사는 양측의 전문가들로 구성된 위원회인 Failure Review Board (FRB)를 구성하였으며 2차 발사의 실패의 원인 규명을 위하여 노력하고 있다. 2차 발사시에는 2단 점화전에 사고가 발생하여 알수 없지만 1차 발사시의 데이터 분석 결과 PLF 시스템을 제외한 상단의 다른 모든 시스템들은 정상 작동하였음을 확인하였다.

우주발사체의 발사에 있어서 임무의 성공만큼이나 중요한 것이 사고 없는 안전한 발사이다. 이러한 안전한 발사를 이루기 위하여 우주발사체 사업단은 흐루니체프사와의 협력을 통해 안전 프로그램을 개발한 바 있다.

발사시의 안전은 발사체의 안전, 지상 설비의 안전, 그리고 비행 중의 안전인 비행 안전등으로 구분할 수 있으며 제품 보증의 입장에서 추후 일어날 수도 있는 사고를 미연에 방지하고 안전을 보증할 수 있도록하는 각종 분석과 활동이 기술적 안전 관리 활동이라고 말할 수 있다.

본 논문에서는 이와 관련하여 발사체의 안전 프로그램에는 SAP, 위험 요소 분석, 비정상 비상 상황 분석, 비상시 대처 방안 등이 포함되어 있다.

## 2. KSLV-I의 안전 관리

항우연과 러시아의 흐루니체프사는 발사체 전체 시스템을 공동 개발 하였다. 양측은 각각 자신이 개발하는 시스템에 대한 책임을 지고 있다. KSLV-I은 1단과 상단으로 이루어졌다. 이중 1단은 산화제 탱크와 연료 탱크, 1단 엔진등으로 구성되어 있으며 흐루니체프가 개발 책임을 가졌다. 페이로드 페어링(PLF)과 2단으로 구성된 상단은 항우연이 개발하였고 개발의 책임을 진다.

이러한 복잡한 상호 책임 문제 하에서 안전한 발사를 이루기 위해서 한리 양측은 다음과 같은 작업을 수행할 것을 상호 합의하였다. 여기에는

- 안전 보장 계획 (safety assurance plan, SAP)에 따른 안전 대책 수립
- 상단부와 하부 컴퍼넌트 들에 대한 안전 프로그램 작성
- 가능한 위험 상황에 대한 안전 분석 수행

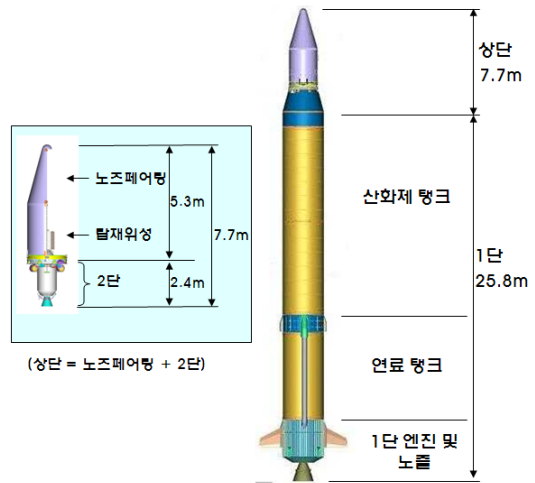


Fig. 1 KSLV-I의 제원

- 발생 가능한 비정상/비상 상황 목록의 작성
  - 발생 가능한 비정상/비상 상황에 대한 대응 방법 작성
  - 운용시의 안전 유의 사항 작성
  - 발생 가능한 비정상/비상 상황의 검지 방안
  - 비상 대응 계획 (Emergency Action Plan)과 표준 운용 지침 (Standard Operation Procedure)
  - 안전 대책의 완성에 대한 conclusion 작성
  - 운용 문서 (operational document, OD)상의 안전 관련 대책 검증
  - 필요시, 비행 시험 결과에 따른 설계 문서, 시험 문서, 운용 문서의 수정 등이 포함된다.
- 위의 내용을 만족시키기 위해 다음과 같은 다양한 분석과 문서들의 작성 등이 이루어 졌다.

### 2.1 Safety Assurance Plan (SAP)[1]

SAP는 KSLV-I의 안전을 보장하기 위한 기본 문서이다. 항우연과 흐루니체프사는 상세 설계단계에서 SAP의 목적에 합의하였으며 상기의 업무 scope에 따라 항우연이 상단부 등의 SAP를 작성하였다.

여기에는 안전의 주요 원칙, 안전 요구조건, 안전 활동 및 대책, SAP 적용의 확인 방안 등의 내용이 포함되어 있다.

### 2.2 Failure mode and effect analysis (FMEA)

**Failure Modes and Effects Analysis**

ID: 1440		Project by: 00_Seam																	
Name: 00-East High Pressure T000		Date: 2008.11.20																	
NO.	Function	Failure Mode	Failure Effect	Failure Detection Method or Characteristic Parameter	F	S	D	C	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP	CP
1	2	3	4	5	6	7a	7b	7c	7d	7e	7f	7g	7h	7i	7j	7k	7l	7m	7n
1	1. Fuel injection (to prevent flame-out)	Failure of fuel injection	Flame-out	Pressure sensor	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2	2. Supply of high pressure gas to combustion chamber	Failure of high pressure gas supply	Flame-out	Pressure sensor	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
3	3. Ignition	Failure of ignition	Flame-out	Pressure sensor	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Fig. 2 나로호 상단부 FMEA의 예시

FMEA는 신뢰성/안전 관리에 있어서 기본이 되는 분석 방법이다. 이것은 시스템의 기능, 고장 모드, 원인, 고장의 영향, 그리고 정량적인 심각도나 발생 빈도, 치명도 값등의 열로 구성된 데이터 sheet의 종합으로 이루어져 있다.[2]

항우연은 발생 가능한 모든 고장 모드들을 발사체와 발사 시스템의 element 수준에서 분석하여 인지하였으며 그 원인과 결과등을 분석하고 심각도를 평가하였다. 이러한 작업은 신뢰성 관련 연구원들이 하드웨어 설계 개발자들과 심도 깊은 협의를 통해 이루어졌다.

### 2.3 Critical Items List (CIL)[3]

FMEA 결과를 이용하여 상단부와 발사 시스템에 대한 치명 요소 리스트 (CIL)를 작성하였다. 여기에는 해당 품목의 특성과 위험 요소, 그리고 제어 방법 등이 포함되어 있다.

상단부의 치명 요소는 KM 추진제, 점화기, 분리장치들의 화약류, RCS의 압력 용기 그리고 배터리 등이 선정되었다. 지상 시스템의 치명 요소들은 케로신, 액체 산소, 액체 질소, 그리고 고압 헬륨 등이 확인되었다.

### 2.4 비행 준비 및 비행 중의 비정상/ 비상 상태 (abnormal/emergency situations, AS/ES)목록[4]

러시아 측과의 합의에 따라 항우연은 발사패드에서 비행 준비 중에 발생할 수 있는 비정상 상태와 비행 중 발생할 수 있는 비상 상태의 목록을 작성하였다. 이것은 양측이 합의한 표의 형태로 작성되었는데 여기에는 비정상/비상 상황의 명칭, 발생 원인, 검지 방법, 결과와 대책 등이 들어가 있다.

No.	AS description	Possible cause of AS	AS occurrence phase	Identification items	Signals of AS occurrence	Potential effects of AS	AS management measures (the counter)	Remarks
1	AS of power control device	1. Auto ignition of power control due to EM, ESD	After SRV armup test	LV FACSL, ground TLM	- Spacenet separation on ground - Damage on vehicle	- Launch abort		
2	AS of SRV	2. Auto ignition of power control due to temperature growth	After SRV armup test	LV FACSL, ground TLM	- Spacenet separation on ground - Damage on vehicle	- Launch abort		
3	AS of FTS	3. SRV armup failure	After SRV armup test	LV FACSL, ground TLM	- Spacenet separation on ground - Launch abort	- Launch preparation stop - Launch abort	- Continued emergency launch abort - Report to mission director - Launch abort	- If it is impossible to replace faulty units on LC, launch abort. VFD/ISS about VFD/ISS
4	AS of FTS	4. SRV receiver failure	After SRV armup test	LV FACSL, ground TLM	- Spacenet separation on ground - Launch abort	- Launch preparation stop - Launch abort	- Continued emergency launch abort - Report to mission director - Launch abort	- If it is impossible to replace faulty units on LC, launch abort. VFD/ISS about VFD/ISS
5	AS of FTS	5. FTS/PLU detector failure	After SRV armup test	LV FACSL, ground TLM	- Spacenet separation on ground - Launch abort	- Launch preparation stop - Launch abort	- Continued emergency launch abort - Report to mission director - Launch abort	- If it is impossible to replace faulty units on LC, launch abort. VFD/ISS about VFD/ISS
6	AS of FTS	6. Abnormal FTS signal appearance due to ESD	After SRV armup test	LV FACSL, ground TLM	- Spacenet separation on ground - Launch abort	- Launch preparation stop - Launch abort	- Continued emergency launch abort - Report to mission director - Launch abort	- If it is impossible to replace faulty units on LC, launch abort. VFD/ISS about VFD/ISS

Fig. 3 나로호 상단부 비정상 상황의 예

항우연은 비정상 상황을 발사전 15분에 시작되는 자동 운용 단계인 PLO 이전 시점과 이후 시점으로 나누었는데, 이는 PLO 단계에서는 자동 시퀀스가 구동되어 오직 비상 정지의 방법으로만 운용을 멈출 수 있기 때문이었다. 비상 상황의 경우는 비행 중지 시스템 (flight termination system, FTS)의 구동 여부에 따라 역시 두 종류로 나누어 정리하였다.

이 문서는 발사 책임자 매뉴얼에 포함되었다.

### 2.5 Emergency Action Plan / Standard Operation Procedure (EAP-SOP)[5]

지상에서 화재나 폭발과 같은 재해 상황이 발

**Emergency Action Procedure in Case of Fire or Explosion in QT and FT**

Launch Vehicle	Space Center	Governmental Organization	Countermeasures	Remarks
accident fire or explosion Report the situation / Our site emergency action	Emergency report Request to emergency backup Spread the news	1st witness (on site or LCQ) - rapidly spread the news and perform emergency action - report to "Central Control Room" and Launch Vehicle Safety Manager about the accident - in case of casualty, perform 1st aid treatment if possible (on site) - Launch Vehicle Safety Manager (LVSM) - report to Work Manager, Safety Manager and Launch Director - Work Manager - order to perform on site emergency action (Stop operation, spread the news of accident, on site evacuation, stop stacking air, run automatic fire protection system (L109))	- Central Control Room - LVSM	
			- On-site operator - rapidly evacuate from the scene using vehicles to 1st aid room	- 1st aid room
			- Central Control Room Operator - After recognition, report to Ground Safety Manager via the "Emergency logbook" - Ground Safety Manager (GSM) - ask for emergency dispatch to CP of National Emergency Management Agency* (*This includes hospital/ambulance etc) ask for emergency medical service to "Gyeongju County Office"	
			- Ground Safety Manager (GSM) - rapidly spread the accident news through word-of-mouth communication - broadcast the news over vehicle space center - CCTV monitoring	
Dispatch of System Emergency Standby Team	Dispatch of Fire Safety and ambulance		- Work Manager - decide the entry of fire truck, order to dispatch System Emergency Standby Team with fire fighters	- System Emergency Standby Team (SE, LMET, Maintenance) and repair team with protective gears
estimation of the damage Check the site record			- Ground Safety Manager (GSM) - estimate the scale of damage: materially or nonal - Ground Safety Manager (GSM) - traffic regulation to control the passage of vehicle and personnel in LC - record and filming of accident site, get statement from witness	

Fig. 4 표준 운용 절차의 예

생시 자세한 대응 방안이 사전에 작성되어 있어야만 한다.

EAP는 재해 상황을 다루는 문서이다. 여기에는 다양한 종류의 재해 상황과 가능한 원인, 가능한 대응책을 발사대와 지상 안전, 해상 안전, 공역 안전의 측면에서 정리한 문서이다. 발사 운용 단계는 발사체 이송, 발사 준비, 그리고 발사 이후로 나뉜다. 가능한 재해 상황들은 발사체의 화재나 폭발, 산화제나 추진제 혹은 고압 가스의 누출 그리고 유틸리티 빌딩에의 누수 등을 들을 수 있다.

상기의 Fig. 5는 표준 운용 지침 상의 work flow를 보여주고 있다. 여기에는 재해 발생시 책임자 및 운영자와 그들의 행동등이 나타나 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 KSLV-I 나로호의 안전을 확보하기 위한 다양한 활동과 문서들에 대하여 소개하였다. 나로호의 개발이 국제 공동으로 수행되었기 때문에 신뢰성이나 안전과 관련된 이슈는

양측이 매우 민감한 부분이었다. 항우연과 흐루니체프사는 KSLS의 안전을 향상시키기 위한 다양한 활동을 수행할 것을 합의하였으며 그 결과, 안전한 발사를 이루는데 기여할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. KARI and KhSC, *Safety Assurance Program for KSLV-I*, 2005
2. KARI, FMEA result of KSLV-I upper stage, PN61300PA00000-0004, 2006
3. KARI, Safety Critical Items and Safety Control Plan of KSLV-I Upper Stage, IF0C001P0247, 2009
4. KARI, Definition and Measures of Abnormal and Emergency Situations during Prelaunch Preparation, Launch and Flight of KSLV-I, IF0C001P0254, 2009
5. KARI, *Operational Safety Manual for KSLV-I*, 2009