

KSLV-I 나로호의 발사체 안전 관리

조상연*, 신명호**, 오승협***, 김영목****

Safety Management for KSLV-I, Naro

Sang Yeon Cho*, Myung Ho Shin**, Seung Hyup Oh***, Young Mok Kim****

Abstract

KSLV-I, a.k.a. Naro 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 - inject the space craft into the designated orbit - were not successful, safety of launch vehicle was accomplished through the cooperation with the Russian partner Khrunichev Space Research and Production Center (KhSC). Both parties co-developed the 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 8월에 이루어진 1차 발사는 위성을 궤도로 올리려는 목표 달성에는 실패하였지만 발사를 안전 관점에서 보았을 때는 사고 없이 안전하게 이루어졌다. 2010년 6월의 2차 발사에서도 인명이나 시설 손상과 같은 사고는 없었다. 이러한 안전한 발사를 이루기 위하여 우주발사체 사업단은 흐루니체프사와의 협력을 통해 발사체 안전 프로그램을 개발한 바 있다. 본 논문에서는 안전 관리 프로그램에 속해있는 각종 분석들과 그 내용들을 소개하고자 한다.

키워드 : KSLV-I 나로호 (KSLV-I Naro), 안전 (safety), 치명 요소 (critical item), 비정상 비상 상황 (abnormal/emergency situation)

1. 서 론

KSLV-I 나로호는 대한민국 최초의 위성발사체로 나로우주센터에서 2009년 8월 25일 1차로 발사되었고 2010년 6월 10일 2차 발사가 이루어졌다. 나로호의 임무는 1차에서는 페어링 한쪽이 분리되지 않은 이유로 실패하였지만 그 외의 다른 모든 시스템들은 정상 작동하였음을 발사이후

접수일(2010년 1월 12일), 수정일(1차 : 2010년 4월 6일, 2차 : 2010년 6월 15일, 게재 확정일 : 2010년 10월 1일)

* 추진기관체계팀/chosangy@kari.re.kr ** 체계종합팀/myshin@kari.re.kr ***추진기관체계팀/shoh@kari.re.kr

**** 우주발사체추진기관실/ymkim@kari.re.kr

데이터 분석을 통해 확인하였다. 안타깝게도 2차 발사 임무역시 비행 시작 130여초 만에 실패하였으며 현재 그 원인을 분석중이다.

나로호의 개발에 있어서 항공우주연구원은 발사체 개발의 경험이 풍부한 러시아의 흐루니체프사(KhSC)와의 협력을 통해 발사체 1단 및 부족한 시스템 개발 기술 등을 습득할 수 있었다.

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. 안전 프로그램에는 SAP, 위험 요소 분석, 비정상 비상 상황 분석, 비상시 대처 방안 등이 포함되어 있다.

2. 본 론

2.1 나로호의 제원

나로호는 약 100kg 급의 인공위성을 지구 저궤도에 진입시킬 수 있는 소형 위성 발사체이다.

나로호의 주요 설계 변수는 아래의 그림 1 과 같다.

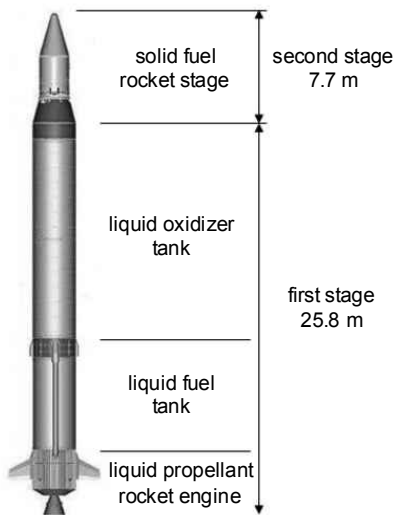


그림 1. 나로호의 제원

나로호는 2단형 로켓으로 1단은 러시아의 흐루니체프사에서 개발하였고 상단은 항우연이 개발하였다. 1단의 추진기관은 역시 러시아의 에네르고마쉬사가 개발한 액체 로켓 엔진이 사용되었으며 액체 산소와 케로신을 각각 산화제와 연료로 사용한다. 1단의 진공 추력은 약 201tonf 이며 길이는 25.8m, 최대 직경은 2.9m 이다.

길이 7.7m의 상단은 2단부와 위성, 페어링 등으로 이루어져 있다. 2단의 추진기관은 고체 추진체를 사용하는 키크모터로 항우연과 (주)한화가 공동 개발하였다. 키크모터의 노즐부는 추력 벡터 제어가 가능한 변형노즐이 적용되었다. 2단 추진기관의 진공 추력은 약 9.9 tonf이다.

나로호에 장착된 위성은 과학위성 2호(STSAT-2)로 항우연과 KAIST 위성연구센터에서 개발되었으며 무게는 100kg이다.

2.2 나로호 1차 발사 결과 소개

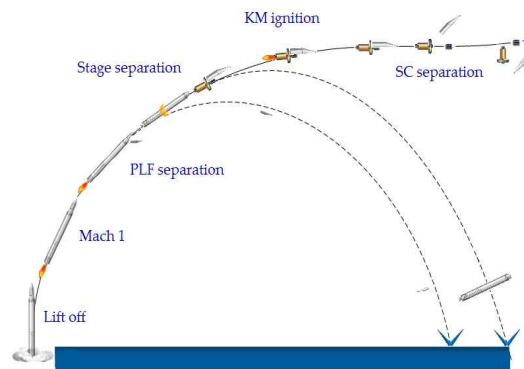


그림 2. 나로호 1차 발사 결과

2009년 8월 25일 대한민국 역사상 최초의 위성 발사체인 KSLV-I 나로호가 고흥 나로우주센터에서 발사되었다. 나로호의 임무 시퀀스는 PLF 분리, 1/2단 분리, 2단 점화, 위성 분리 등으로 구성되었으며 미션 종료까지 이륙 후 약 1100초가 소요될 계획이었다.

이륙 후 215초인 PLF 분리 시점에 한쌍의 페어링 중 한쪽이 분리되지 않는 비정상 상황이 발생하였다. 이 때문에 발사체는 정상적인 고도와 자세를 유지하지 못했고 위성 투입에 실패하였다. 그러나 PLF의 비정상 상황 이외에 2단 추진 기관이나 추력 벡터 제어기, 위성 분리 장치 등과 같은 다른 시스템들은 정상 작동이 확인되었으며 무엇보다도 안전 측면에서 아무런 사고 없이 발사가 이루어졌다고 평가할 수 있다.

2.3 KSLS의 안전 관리¹

항우연과 러시아의 흐루니체프사는 발사체 전체 시스템을 공동 개발 하였다. 양측은 각각 자신이 개발하는 시스템에 대한 책임을 지고 있다. 발사체 전체 시스템 KSLS는 발사체인 KSLV, 조립 설비 (assembly complex, AC), 발사대 (launch complex, LC), 데이터 계측 제어 시스템(data measurement acquisition and processing complex, DM APC), 그리고 이송 설비 (transport means) 등으로 구성된다. 아래의 표 1은 각 시스템 별 work scope를 나타내었다.²

표 1 KSLS의 work scope

	Design	Manufact.	Test & Verification	Op.
Stage I	KhSC	KhSC	KhSC	KhSC
Upper Stage	KARI	KARI	KARI	KARI
AC/LC	KBTM KhSC	KARI KhSC	KARI KBTM KhSC	KARI KhSC KBTM
DMAPC	KARI	KARI	KARI	KARI

이러한 복잡한 상호 책임 문제 하에서 안전한

발사를 이루기 위해서 양측은 다음과 같은 작업을 수행할 것을 상호 합의하였다. 여기에는

- a. 안전 보장 계획 (safety assurance plan, SAP)에 따른 안전 대책 수립
- b. 상단부와 하부 컴퍼넌트 들에 대한 안전 프로그램 작성
- c. 가능한 위험 상황에 대한 안전 분석 수행
- d. 발생 가능한 비정상/비상 상황 목록의 작성
- e. 발생 가능한 비정상/비상 상황에 대한 대응 방법 작성
- f. 운용시의 안전 유의 사항 작성
- g. 발생 가능한 비정상/비상 상황의 검지 방안
- h. 비상 대응 계획 (Emergency Action Plan)과 표준 운용 지침 (Standard Operation Procedure)
- i. 안전 대응책의 완성에 대한 conclusion 작성
- j. 운용 문서 (operational document, OD)상의 안전 관련 대책 검증
- k. 필요시, 비행 시험 결과에 따른 설계 문서, 시험 문서, 운용 문서의 수정 등이 포함된다.

위의 내용을 만족시키기 위해 다음과 같은 다양한 문서들의 작성과 작업 등이 이루어 졌다.

2.3.1 Safety Assurance Plan (SAP)³

SAP는 KSLS의 안전을 보장하기 위한 기본 문서이다. 항우연과 흐루니체프사는 상세 설계단계에서 SAP의 목차에 합의하였으며 상기의 업무 scope에 따라 항우연이 상단부 등의 SAP를 작성 하였다. 여기에는 안전의 주요 원칙, 안전 요구조건, 안전 활동 및 대책, SAP 적용의 확인 방안 등의 내용이 포함되어 있다.

2.3.2 Failure mode and effect analysis (FMEA)

FMEA는 신뢰성/안전 관리에 있어서 기본이 되는 분석 방법이다. 이것은 시스템의 기능, 고장

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

Launch Vehicle	Space Center	Operational Organization	Countermeasures	Remarks
Accident fire or explosion if suspect the abnormal / Occure emergency action			<ul style="list-style-type: none"> 1st witness (on site or LCC) 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 (LVSOM) report to Work Manager, Safety Manager and Launch Director Work Manager order to perform on site emergency action (Stop operations, spread the news of accident, in site evacuation, stop supplying etc, run automatic fire protection system (L100)) 	<ul style="list-style-type: none"> Central Control Room LVSOM
			<ul style="list-style-type: none"> On-site operator rapidly evacuate from the room using vehicle to 1st aid room 	<ul style="list-style-type: none"> 1st aid room
		Emergency emergency report	<ul style="list-style-type: none"> Central Control Room Operator After recognition, report to Ground Safety Manager write the "Emergency logbook" Ground Safety Manager (GSM) ask for emergency dispatch to CP of National Emergency Management Agency (Fire truck, fire boat, ambulance etc) ask for emergency medical service to "Gobang County Office" 	
		Request for emergency backup		
		Spread the news	<ul style="list-style-type: none"> Ground Safety Manager (GSM) rapidly spread the accident news through wired/wireless communication broadcast the news over whole space center CCTV monitoring 	
		Request of System Manager/Healthy Team	<ul style="list-style-type: none"> Work Manager decide the entry of fire truck, order to dispatch System Emergency Standby Team with fire fighters 	<ul style="list-style-type: none"> System Emergency Standby Team (SE, LVST, Maintenance and repair team with protective gear)
		Request of Fire fighters and ambulance		
		Activation of the Manager	<ul style="list-style-type: none"> Ground Safety Manager (GSM) estimate the scale of damage, material/personal 	
		Control of the site record	<ul style="list-style-type: none"> Ground Safety Manager (GSM) traffic regulation control the passage of vehicle and personnel in LC record and filming of accident site, get statement from witness 	

그림 5 표준 운용 절차의 예

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 들 수 있다. 예를 들어 발사대 건물에 화재가 발생할 경우 가능한 원인은 다음과 같이 정리된다.

- 1단 엔진 점화에 따른 화재 발생 이후 화재 방지 시스템의 작동 실패
- 1단 엔진 점화에 따른 화재 발생 이후 열 제어 시스템의 작동 이상
- 추진제 증기의 밀집 지역에 발화 물질 가하기
- 낙뢰에 의한 화재
- 발사대에서 2단 추진기관의 비정상 점화

이러한 상황 하에서의 대응책은 아래와 같다.

- 진행 중인 발사 운용의 정지
- 발사 운용자의 상황 인지
- 재해 지역으로부터 부상자 철수
- 발사체 및 재해 영역 근방으로의 고압가스 공급 중단
- 재해 영역 근방의 전기 공급 차단
- 환기 시스템 정지
- 화재 방지 시스템 및 소방 시스템 가동
- 소방차, 구급차 출동

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

2.3.6 발사 운용시의 안전

나로호의 발사 운용은 주로 안전의 관점에서 수행 되었다. 연료나 산화제의 충전이나 배출 그리고 점화기의 장전 등은 모두 발사대로부터 2km 떨어진 발사 통제동에서 완전 자동으로 수행되었다. 또한 운용 문서와 발사 시나리오에 따라, 모든 작업자는 발사체에 헬륨 충전 이전에 발사대에서 안전지역으로 대피하도록 규정되어 있다. 이러한 지침에 의해 인명 사고의 가능성을 제거 할 수 있었다.



그림 6 발사대로부터의 안전 거리

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 KSLV-I의 안전을 향상시키기 위한 다양한 활동을 수행할 것을 합의하였으며 그 결과, 안전한 발사를 이루는데 기여할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Myoung Ho Shin, Sang Yeon Cho, Jeong hwan Ko, Gwang Rae Cho, System Engineering Processes to Assure Reliability and System Safety of KSLV-I Launch and Flight, *AC-09-D1.3.5*, Deajeon, Korea, 2009
2. KARI and KhSC, *Final Report on KSLV-I Readiness for Flight Tests*, 2009.
3. KARI and KhSC, *Safety Assurance Program for KSLV-I*, 2005
4. KARI, FMEA result of KSLV-I upper stage, *PN61300PA00000-0004*, 2006
5. KARI, Safety Critical Items and Safety Control Plan of KSLV-I Upper Stage, *IFOC001P0247*, 2009
6. KARI, Definition and Measures of Abnormal and Emergency Situations during Prelaunch Preparation, Launch and Flight of KSLV-I, *IFOC001P0254*, 2009
7. KARI, *Operational Safety Manual for KSLV-I*, 2009