

우주발사체 비행실패 사례 분석

심형석, 고정환, 최기성, 노용래
한국항공우주연구원

Case Study on Space Launch Vehicle Failures

Hyung-Seok Sim, Jeonghwan Ko, Kyu-Sung Choi and Woong-Rae Roh

I. 서론

우주 발사체 개발의 역사는 1957년 구소련의 스푸트닉 위성의 발사 성공에서 시작되었다. 이후 반세기에 걸쳐 우주 발사체 기술은 초창기의 수많은 실패를 딛고 신뢰도 및 발사 성공률을 비약적으로 증가시켜 왔다. 하지만 극한 상황에서 운영되어야 하는 특성상 우주 발사체는 많은 실패의 위험을 안고 있으며 실제로 새로이 개발되어 발사되는 발사체를 비롯하여 신뢰성이 검증된 상용 발사체의 경우에도 종종 발사에 실패하고 있다. 우주 발사체의 발사 실패는 발사체 및 인공위성의 제작에 투입된 막대한 비용과 시간의 손실, 발사체의 지상 추락에 의한 재산 및 인명 피해, 대량의 연료에 의한 환경 파괴 및 국가적 위신의 타격 등을 유발하게 된다. 다행히 많은 우주 발사체가 신뢰성보다 가격 및 개발 일정에 우선순위를 두고 개발이 이루어진 탄도 미사일(ballistic missile)에서 유래한 점을 고려할 때 우주 발사체 기술에는 많은 개선의 여지가 있다 [1]. 발사체 개발의 선진국들은 이전의 실패 사례 분석을 통한 꾸준한 제작 기술의 보완을 통하여 발사체의 신뢰도를 향상시키고 있으며, 실제로 ESA(European Space Agency)의 Ariane 로켓의 경우 Ariane 1, 2, 3의 결함은 지속적으로 보완하여 기록적인 성공률을 보유한 Ariane4를 개발한 바 있다 [2].

발사체의 발사 실패는 위성의 손실이라는 직접적인 손실 이외에 지상에 추락할 경우 인명 피해를 발생시킬 수 있는 위험이 높으므로 발사 전 혹은 발사 시험 중에 비행 안전에 관한 고려가 필수적이다 [3]. 이를 위하

여 비행 안전에 대한 분석이 발사 전에 이루어지고 지상 통제 센터 및 발사체 기체 내에 비행안전 시스템이 구성된다. 비행안전 시스템은 발사체의 비정상 비행 상황을 대비한 시스템이므로 개발되는 발사체에 대한 특성 파악, 기존 발사체들의 발사 실패 사례 검토를 통한 비정상 모드 분석 등을 통해 면밀하게 구성되어야 한다.

본 연구에서는 세계 각국의 우주 발사체 실패 사례를 몇 가지 기준에 따라 분석함으로써 현재 국내에서 진행 중인 KSLV-I 발사체의 개발 및 KSLV-I의 발사에 적용될 비행안전 시스템의 구성에 참조가 되도록 하는데 그 목적이 있다. 또한 세계 각국의 발사체 개발 과정 및 성공률 등에 대해 살펴보고, 각국에서 최초로 개발된 발사체에 대하여 소개함으로써 우주 발사체로서는 국내에서 최초로 개발이 진행 중인 KSLV-I과 비교할 수 있도록 하였다.

II. 본론

2.1 세계 각국의 우주 발사체

우주 발사체 실패 사례 분석의 이해를 위해 세계 각국의 발사체 개발의 역사를 살펴볼 필요가 있다. 아래에 각국의 발사체 개발 역사와 함께 I-Shih Chang이 집계한 세계 각국의 연도별 비행 실패 통계를 인용하여 기술하였다 [1,4,11].

현재 우주 발사체 시스템을 갖춘 것으로 알려진 나라 및 컨소시엄은 미국, 러시아를 비롯하여 ESA(European Space Agency), 중국, 일본, 인도, 이스라엘, 브라질, 북한 등을 포함한다. 그 외에 영국 및 프랑스, 호주 등

이 발사체를 개발한 역사가 있으나 영국, 프랑스는 현재 ESA에 참여하고 있고 호주는 더 이상 발사체 개발을 추진하고 있지 않다.

러시아(구소련 포함)는 1957년 최초의 위성을 지구 궤도에 쏘아 올렸고 이후 세계 발사체 기술을 주도하고 있는 국가로써, 대표적인 발사체인 Soyuz는 통계적으로 세계에서 가장 높은 성공률을 보여준다(96.8%). 러시아는 1957년 이래로 자국을 제외한 모든 나라가 쏘아올린 위성을 합한 것보다 많은 위성 발사에 성공하였다. 1957년부터 1999년까지 전 세계적으로 4379번의 위성 발사가 행해졌으며, 이 중 러시아에 의해 2770번의 발사가 이루어 졌다. 이 기간동안 러시아의 전체 발사체 성공률은 93.5%를 기록했다.

미국은 러시아와의 우주 개발 경쟁을 통하여 1957년의 Vanguard의 발사 실패를 극복하고 최초의 인류 달 착륙 성공 등으로 러시아와 함께 우주 역사를 선점하고 있다. 우주 왕복선을 제외하고 현재 운영중인 발사체 중에서 가장 높은 성공률을 가진 발사체는 Delta발사체로 94.2%의 성공률을 보인다. 1957년부터 1999년까지 미국은 1316번의 발사를 수행하였고, 이 기간 동안 전체 발사체 성공률은 87.5%를 기록했다. 절반 이상의 실패는 우주 개발 첫 10년에 발생한 것으로 전체 164번의 실패 중 101번의 실패가 1957~1966년 중에 발생하였다.

유럽의 발사체 개발은 1960년대부터 시작되어 ELDO(European Launcher Development Organization)를 거쳐 1975년 ESA(European Space Agency)로 통합되어 현재는 유럽 14개국이 참여하는 컨소시엄 형태로 운영되고 있다. 프랑스와 영국은 1965년, 1971년 각각 성공적으로 위성을 궤도에 진입시켰으나 현재는 ESA의 일원으로 참여중이며 독립적인 개발은 수행하지 않는다. ESA는 상용 위성 발사사업에 성공적으로 진출하여 러시아와 미국이 독점하다시피한 시장점유율을 상당부분 획득하였으며 최근엔 매년 10회 이상의 발사를 수행하고 있다. ESA의 대표적인 발사체인 Ariane은 현재 Ariane5까지 개발되었고 가장 많은 발사를 수행한 Ariane4의 경우 96.4%의 성공률을 가진다.

중국의 발사체 기술은 러시아에서 도입된 대륙간 탄도 미사일 개발 기술에서 유래하

였다. 1960년 양국간의 마찰로 기술 이전이 중단된 이후 정책적으로 우주 개발을 강하게 추진한 중국은 1970년 CZ-1 발사체를 이용한 위성 궤도 진입에 성공하였다. 이후 이를 개량한 CZ-2,3,4 및 FB-1이 계속하여 개발되었고, CZ-2C의 경우 총 11번의 발사에서 성공률 100%를 보였다. 중국은 1957년부터 1999년까지 총 68번의 발사를 시도하여 전체 성공률은 82.4%를 기록하였다.

일본은 1955년 관측 로켓(sounding rocket)개발을 시작한 이래로 ISAS(Institute of Space and Astronautical Science)를 중심으로 고체 엔진을 이용한 발사체의 개발이 진행되었고 1969년 NASDA(National Space Development Agency of Japan)가 설립되면서 본격적으로 미국의 발사체 기술을 도입하였다. 일본은 1970년 Lambda 발사에 성공하여 이후 M, N, H 로켓 등을 성공적으로 개발하였으며 1977년부터 1994년까지 행해진 39번의 발사에서 성공률 100%를 기록하기도 하였다. 1957년부터 1999년까지 일본은 총 61번의 발사를 시도하여 85.2%의 성공률을 기록하였다.

발사체 시스템을 갖춘 국가 중 위에서 언급되지 않은 나머지 나라들은 상대적으로 우주 개발의 역사가 짧고 발사 횟수도 적다. 인도는 개발 초기의 많은 난관을 경험하였지만 국가적으로 상당한 예산을 투자하여 개발을 진행하고 있다. 러시아에서 기술이전을 받아 개발된 GSLV는 2500kg의 위성을 지구 전이궤도(GTO)까지 올릴 수 있는 대형 발사체로 2004년까지 3번의 발사에 모두 성공하였다. 이스라엘은 1988년 Shavit 발사에 성공한 이래 총 4번의 발사에서 75%의 성공률을 가진다. 브라질은 관측로켓을 개량한 VLS 로켓 개발을 시작으로 20여년간 우주 발사체 개발을 진행하고 있지만 아직까지 위성 발사에 성공하지 못하고 있다. 북한은 러시아에서 관련 기술을 전수 받아 1998년 대포동1호 로켓을 이용한 광명성 위성 발사를 시도하였으나 3단에서 실패한 것으로 추측되었다[1,4].

표 1은 1957년부터 1999년까지 발사된 각국의 발사체의 성공률 및 발사 시도 건수를 시대별로 통계를 낸 것이다. 괄호 안의 숫자는 전체 발사 시도 건수를 의미한다. 대체적으로 각국의 성공률이 시간이 지남에 따라

개발 초기에 비해 개선되고 있음을 알 수 있다. 90년대 이후 러시아의 성공률이 하락한 이유는 구소련 붕괴 이후의 국내 예산 문제에 기인하며[14], 중국과 일본의 실패율 하락은 발사체의 대형화(H2) 혹은 상단에 극저온(cryogenic) 엔진의 적용(CZ-3) 등에 기인한 것으로 판단된다.

표 1. 각국의 시대별 발사 통계

구분	USA	Rus	Eur	China	Japan	기타	합계
50년대	37.2 (43)	54.5 (11)					40.7 (54)
60년대	84.1 (536)	84.1 (452)	66.7 (6)	0.0 (1)	0.0 (4)	100.0 (1)	83.6 (1000)
70년대	92.1 (280)	94.9 (910)	61.5 (13)	61.5 (13)	88.2 (17)	0.0 (1)	93.4 (1234)
80년대	93.2 (162)	96.3 (961)	87.9 (33)	93.3 (15)	100.0 (23)	50.0 (6)	95.4 (1200)
90년대	93.6 (295)	95.0 (436)	95.6 (91)	87.2 (39)	82.4 (17)	53.8 (13)	93.4 (891)
합계	87.5 (1316)	93.5 (2770)	89.5 (143)	82.4 (68)	85.2 (61)	52.4 (21)	91.1 (4379)

2.2 세계 각국의 최초 우주 발사체

본 장에서는 현재 개발 중인 KSLV-1이 국내에서 처음으로 개발되는 우주 발사체인 점을 고려하여 각국에서 최초로 개발된 발사체에 대해 소개하여 비교가 되도록 하였다. 최초 개발된 발사체의 경우 대부분이 첫 발사시험에서 실패하였으며, 그 발사체의 전체 성공률 또한 매우 낮음을 확인할 수 있다.

구소련의 최초 위성 발사체인 R-7은 대륙간 탄도 미사일(ICBM)의 개념으로 개발된 것으로 역설적이게도 무기로서는 사용되지 못했지만 1957년 10월 4일 세계 최초로 83.6kg의 스푸트닉 위성을 궤도에 진입시켰다[9]. 추진시스템은 1단 엔진과 4개의 부스터로 이루어졌으며 모두 액체를 연료로 사용하였다. 무기로서의 개발과정 동안의 발사 시험까지 포함할 경우 1957년 5월 15일 첫 시험을 시작으로 총 32번의 시험에서 11번의 실패를 경험하였다[7].

미국의 최초 위성 발사체인 Vanguard는 1957년 12월 6일 최초의 발사 시험에서 발사 2초 후 폭발하였다. 실패 원인은 탱크 및 인젝터의 낮은 압력 때문에 연소실의 고온

의 가스가 인젝터를 통하여 연료 시스템으로 새어 들어온 것에 기인한 것으로 밝혀졌다[14]. 총 3단으로 구성된 Vanguard는 1단, 2단은 액체 로켓, 3단은 고체로켓으로 이루어졌고 9kg의 위성을 지구 저궤도(LEO)에 진입시킬 수 있도록 구성되었다. 1955년 개발이 시작된 이래로 1959년 마지막 발사까지 총 12번의 시험에서 8번의 실패를 기록하였다[7].

유럽의 경우 영국의 1단 엔진, 프랑스의 2단 엔진, 독일의 3단 엔진을 사용한 Europa 발사체가 ELDO(European Launcher Development Organization)에 의해 처음으로 개발이 시도되었다. Europa는 3단 모두 액체 로켓으로써 200kg의 위성을 지구정지궤도(GEO)에 올릴 수 있도록 설계되었다. 1961년 시작되어 1971년 영국의 참가 중단으로 종료될 때까지 부분적인 발사 시험을 포함하여 11번의 발사 시도가 있었고 이 중 7번의 실패를 경험하였다. 1968년 첫 위성 발사 시험을 비롯하여 1,2,3단 엔진을 모두 사용한 테스트에서는 한번의 성공도 이루지 못하였다. Europa 발사체는 영국의 철수로 프로젝트가 취소된 후 Ariane으로 대체되었다[7].

중국의 최초 발사체인 CZ-1은 DF-4 탄도 미사일을 개량하여 제작되었다. 총 3단 중에서 1단 및 2단은 액체, 3단은 고체 로켓으로 구성되었고 250kg의 위성을 지구전이궤도(GTO)에 올릴 수 있도록 설계되었다. 1965년 개발이 시작된 CZ-1은 일본과의 첫 위성 발사 성공에 대한 경쟁의 과정에서 1969년 11월 16일 첫 발사 시험을 시행하였으나 발사 69초 후 2단에서 실패하였다. 이후 1970년 2번째 발사 시도에서 성공하였고, 전체적으로 4번의 발사 시도에서 2번의 실패를 기록하였다.

일본의 경우 Lambda 4가 최초의 위성 발사체로 개발되어 1966년 첫 발사 시험을 수행하였으나 4단 자세 제어 실패로 성공하지 못하였다. Lambda 4는 고체연료를 사용하는 4단으로 이루어진 발사체로 26kg의 위성을 지구 저궤도에 올릴 수 있는 능력을 가졌다. 1974년 마지막 발사까지 모두 9번의 발사 시험 중 4번의 실패를 경험하였다. 첫 발사 성공은 1970년 2월 11일 12kg의 위성을 저궤도에 진입시킴으로써 이루어 졌다.

인도의 최초 발사체 SLV는 4단 모두 고체로켓을 사용하는 발사체로 40kg의 위성을 저궤도에 쏘아 올릴 수 있도록 구성되었다. 2단 자세제어 실패로 1979년 첫 발사에 실패한 후 1980년 두 번째 발사에 성공하였고, 1983년까지 모두 4번의 발사 시도 중에서 2번의 실패를 경험하였다. 브라질의 VLS는 관측 로켓(sounding rocket)에서 시작하여 우주 발사체로 개량된 발사체로 부스터 및 1,2,3단 모두 고체로켓으로 구성되었다. 380kg의 위성을 지구 저궤도에 올릴 수 있도록 설계되었지만 위성을 탑재하여 시행한 1997, 1999년 2번의 발사에 모두 실패하였다. 2003년 8월 22일에는 발사를 3일 앞둔 시점에 발사 준비 도중 네 개의 메인 고체 모터 중 하나가 점화되면서 폭발하여 모두 21명이 사망하는 사고를 겪기도 하였다. 이스라엘의 shavit은 3단 모두 고체를 연료로 사용하는 발사체로 Jericho 탄도 미사일에서 계량되어 제작되었다. 160kg의 위성을 지구 저궤도에 올릴 수 있는 능력이 있으며 1988년 첫 번째 발사에서 성공적으로 위성을 궤도에 진입시켰고, 이를 포함한 두 번의 발사에 모두 성공하였다. 마지막으로 북한의 대포동 1호는 광명성 위성을 궤도에 올리기 위해 1998년 8월 31일 발사되었다. 북한은 공식적으로 위성이 궤도 진입에 성공하였다고 주장하였으나 여러 정황으로 판단하여 3단에서 실패한 것으로 추정된다[14].

2.3 우주 발사체 실패 사례 분석

우주 발사체 시스템을 운영중인 국가나 회사들은 자신들의 발사 실패에 관한 자세한 자료의 공개를 꺼리고 있고 많은 경우 매우 단편적인 정보만 공개가 이루어졌다. 본 장에서는 공개적으로 얻을 수 있는 비행 실패에 관한 기록을 기반으로 실패 원인 및 실패 구간 등에 대한 분석을 시도하였다. 분석 대상은 실패 원인 및 현상이 공개된 1957년부터 2003년까지 세계 각국의 발사체 비행 실패 사례이며 미국, 러시아의 발사체를 비롯한 300여개의 실패 사례를 포함한다(표2). 실패 사례는 참고문헌[1,2,4~8]에서 수집되었다. 본 연구는 부분적으로 공개된 정보를 바탕으로 분석이 수행되었으며 각 분석의 모집단은 서로 일치하지 않는다. 몇몇 분석 결과들은 비교를 위하여 I-Shih Chang[14]

의 결과들과 비교되었다.

표 2. 분석 대상 비행 실패 사례 통계

구분	USA	Rus	Eur	China	Japan	기타	합계
50년대	20	3					23
60년대	72	44	2		4		122
70년대	15	22	5	1	2	1	46
80년대	8	19	4	1		3	35
90년대	19	18	5	5	3	6	56
00년대	3	6	2	2	2	2	17
합계	137	112	18	9	11	12	299

2.3.1 우주 발사체 비행 실패 사례 소개

발사체의 실패 사례 분석에 대한 이해를 위하여 발사 실패 과정에 대해 비교적 자세히 알려진 대표적인 비행실패 사례에 대해 아래에 소개하였다.

2002년 10월 15일에 러시아에서 발사된 Soyuz 11A511U가 발사 29초 후 폭발하였다. 폭발의 원인은 연료펌프 시스템의 과산화수소라인 오염에 의한 Strap-on D 엔진의 폭발로 추측되었다. 발사체가 발사장 주변에 추락하면서 폭발 잔해에 의해 군인이 한명 사망하는 사고가 발생하였다.

1987년 3월 26일 미국의 Atlas G 발사체가 발사 49초 후 번개에 맞아 비정상 기동 후 지상 명령에 의해 파괴되었다[5]. 번개의 영향으로 발사체의 유도 메모리가 reset 된 후 비정상적인 yaw rotation이 발생하여 발사체가 부서지기 시작하였고, 발사 70초 시점에 지상에서 파괴 명령이 송출되어 강제 종단되었다. 번개가 치던 시점에 텔레메트리 데이터의 약 40%가 비정상적인 값들로 전송됨이 발견되었다.

1996년 6월 4일 Ariane5는 그 첫 번째 비행에서 발사 36초 후 급격한 궤도 이탈 후 과도한 공력을 받아 비행 중 분해되었다. 비행 실패 원인은 SRI(Inertial Reference System)내의 비행 소프트웨어 오류로 밝혀졌는데, Ariane4에 사용된 소프트웨어를 수정 없이 사용함에 의해 Ariane5에는 불필요한 모듈이 포함된 채로 비행이 수행되었다. 이 모듈의 오작동으로 4000m의 고도에서 실행 시스템과 백업 시스템에 수치적 오류가 동시 발생하여 다운되면서 고체 부스터에 잘못된 명령이 전달되어 급격히 궤도를 이탈하였다. 발사체 잔해는 발사장 주변의

높지대에 12km²에 걸쳐 떨어졌지만 인명피해는 없었다[10].

1996년 2월 14일 중국의 CZ-3B 가 자신의 처녀비행에서 발사 2초 후 지상을 향하여 경로를 이탈하여 22초 후 지상에 추락하였다. 실패 원인은 servo-loop로부터의 전기가 끊겨 관성 기준 플랫폼(inertial reference platform)이 기울어지면서 정보판단에 오류를 일으켜 경로를 이탈한 것으로 판명되었다. 발사체는 발사장에서 1.5km 떨어진 마을에 추락하였고 마을 주민 및 군인 59명이 사망하였다. 이에 앞서 1995년 1월 26일에는 CZ-2E가 발사 약 50초 후 폭발하면서 폭발 잔해가 주변 마을에 떨어져 6명이 죽고 23명이 부상당하는 사고가 있었다. 실패 원인으로 발사장 상공의 강한 바람이 지목되면서 이후의 발사에서는 바람의 전단 효과(shear effect)를 줄일 수 있도록 궤도 및 자세 설정이 이루어 졌다[6].

2000년 2월 10일 일본의 M5 발사체가 발사 41초 시점에 세라믹 방열체가 1단 노즐에서 떨어져 나가고 TVC가 불능 상태가 되면서 실패하였다. 실패 원인은 1단 모터 노즐의 틈새로 열이 새어 나와 자세 제어 장비에 손상을 입힌 것에 기인하는 것으로 추정되었다. 2003년 11월 29일에는 H2A 발사체가 부스터를 분리하지 못하여 궤도에 오르기 위한 속도를 얻지 못하고 지상 명령으로 파괴되었는데, 부스터 분리 실패의 원인으로 고체 부스터의 디자인 결점이 제기되었다. 부스터 노즐 목(neck) 부근에 배기가스 와류(vortex)가 형성되어 노즐의 온도를 매우 높게 증가시켰고 노즐 주변에 위치한 부스터 분리 명령을 전달할 도화선이 끊김으로 인해 분리에 실패한 것으로 파악되었다[7].

2.3.2 우주 발사체 실패 원인 분석

KSLV-I의 비행 시험이 처녀비행(maiden flight)임을 고려하여, 수집된 전체 실패 사례 및 처녀비행 실패 사례에 대하여 실패 원인 서브시스템에 대한 분석을 수행하였다. 우주 발사체의 실패 서브시스템의 분류는 참고문헌[5]을 참조하여 이루어졌다. 발사체의 전체 시스템을 6개의 서브시스템으로 구분하였으며 각기 아래와 같다.

1) propulsion : 액체 엔진 및 고체 모터,

추력기, 동력장치(TVC), 연소실, 노즐 및 노즐 밸브, 연료 및 산화제, 터보펌프, 점화 장치, 연소실 내부의 단열 장치

2) structural : SRM(Solid Rocket Motor) 내부 구조, 모터 케이스, 점화기 하우징(housing), 각종 탱크, 단 연결 구조, 페어링, 발사체 외피

3) avionics : onboard S/W 및 컴퓨터, 회로 보드, 자이로, 자세 센서, 하중 경감 센서, 비행안전 관련 장치, 비행 및 유도 제어 장치, 내부 측정 장치, 텔레메트리 장치, 비행 장치

4) separation : 단 및 페어링 분리 메커니즘, 분리를 위한 전기적인 연결

5) electrical : 전기 연결 및 배선, 전력 공급 장치, 전력 relay box, 배터리, 솔레노이드

6) others : 번개 등의 기상 환경, 통신의 문제 등

분석 대상이 된 전체 실패 사례 및 처녀비행 실패 사례에 대한 실패 subsystem 별 비율을 그림 1-2에 나타내었다. 결과 비교를 위하여 I-Shih Chang[1]의 결과를 그림3에 나타내었다. 본 연구에서 수집한 1957년부터 2003년까지의 공개된 실패 사례를 분석한 그림 1과 1983년부터 1998년까지의 실패 사례를 분석한 I-Shih Chang[1]의 결과인 그림 3을 비교할 때 그 결과가 매우 유사함을 알 수 있으며, 여기에 수록되지 않았지만 1980년부터 1999년까지의 사례를 분석한 참고문헌[4]의 결과와도 매우 유사함을 확인할 수 있었다.

세 경우 모두 추진기관 계통의 오작동이 비행실패의 주요 원인으로 전체 실패 사례의 50%를 넘어서고 있고 그 다음으로 단 분리 및 전자탑재 장비의 오작동이 주요한 실패원인임을 알 수 있다. 처녀비행의 경우 전체 실패 사례와 비교하여 추진시스템의 비율이 줄어든 대신 전자 탑재 장비 및 구조 계통의 실패 비율이 높아짐을 확인할 수 있는데 이는 새로운 발사체의 개발에 있어 형상 변경에 따른 잘못된 공력하중 계수 등의 적용 및 이전 발사체의 장비를 그대로 사용함으로 인한 각종 장비의 적응 문제 등에 기인하는 것으로 판단된다.

다음은 KSLV-I을 우리나라와 공동 개발하고 있는 러시아의 발사체에 대한 실패 원인

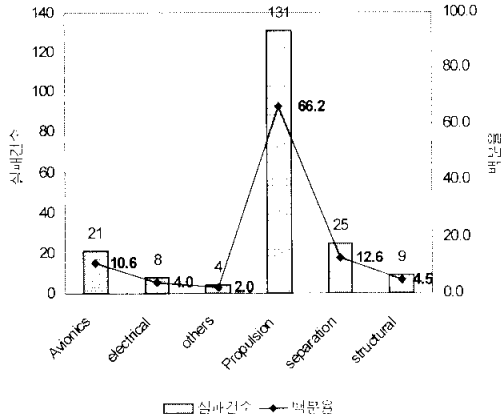


그림 1. 1957-2003 비행실패 원인 분석

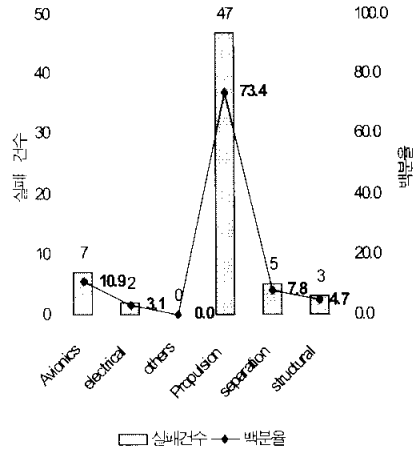


그림 4. 러시아의 비행실패 원인 분석

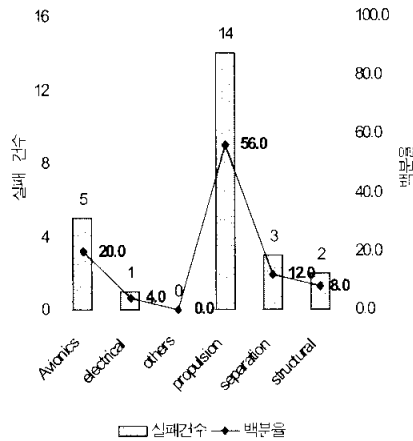


그림 2. 1957-2003 처녀비행 비행실패 원인분석

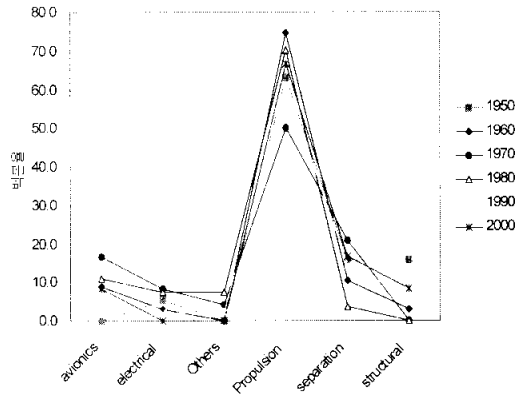


그림 5. 시대별 비행실패 원인 분석

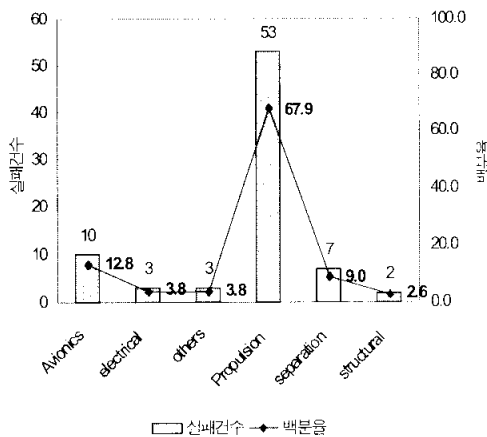


그림 3. 1983-1998 비행실패 원인 분석 (I-Shih Chang[1])

을 분석하였다. 1957년부터 2003년까지 비행 실패한 러시아 발사체의 실패 원인 분석 결과를 그림 4에 나타내었다. 전체 발사 실패 사례와 비교하여 추진 시스템의 비율이 높고 단 분리의 비율이 낮지만 대체적으로 유사한 분포를 보임을 알 수 있다. 러시아의 발사체는 대부분 추진기관으로 액체 로켓을 채용하고 있기 때문에 상대적으로 구조가 간단한 고체 로켓을 혼용하는 다른 나라에 비해 추진시스템의 실패 비율이 높아진 것으로 판단된다.

앞서 시간이 지나감에 따라 발사체 개발 초기 기간에 비해 발사 성공률이 개선됨을 확인할 수 있었는데 실패 원인에 대한 분석 결과는 시대 별로 큰 특징이 발견되지 않았다. 그림 5에 분석 대상 실패 사례에 대한

시대별 실패 원인 분석 결과를 나타내었다. 각 시대별로 실패 원인 분포가 다소 차이가 있지만 유사한 패턴을 보임을 알 수 있다. 개발 역사가 유사한 미국과 러시아만을 대상으로 분석한 결과도 이와 비슷하였다.

2.3.3 우주 발사체 실패 구간 분석

여기에서는 우주발사체 실패사례의 단(stage)별 분포 및 각 단 실패가 주로 어느 서브시스템에서 발생하는지 분석하였다. 전체 발사체는 2단, 3단, 4단 이상 발사체로 구분하여 분석을 수행 하였다. 전체 실패 사례에 대하여 비행 실패가 발생한 구간 분포를 표3에 나타내었다. 발사 실패가 비행 초기 구간에 많이 발생할 것이라는 일반적인 예상과 다르게 모든 발사체에 대하여 1단 보다 2단 및 3단의 실패 비율이 높게 나타났다.

표 3. 1957-2003 비행 구간별 실패 사례 분석

구분 \ 실패 구간	2단 발사체		3단 발사체		4,5단 발사체	
	실패 건수	백분율(%)	실패 건수	백분율(%)	실패 건수	백분율(%)
1단	35	44.9	18	25.4	21	30.4
2단	43	55.1	20	28.2	19	27.5
3단 이상			33	46.5	29	42.0
합계	78	100	71	100	69	100

처녀비행에 대하여 비행 실패가 발생한 구간에 대한 통계는 표4에 제시되어 있다. 전체 사례를 대상으로 했을 때와 비교하여 실패 구간이 앞쪽에 많이 분포됨을 알 수 있는데, 이는 처녀비행에서 1단의 Avionics의 실패율이 높아진 것과 새로이 적용된 시스템이 1단에서부터 오작동을 일으킨 것에 기인한 것으로 판단된다.

표 4. 1957-2003 처녀비행 비행 구간별 실패 사례 분석

구분 \ 실패 구간	2단 발사체		3단 발사체		4,5단 발사체	
	실패 건수	백분율(%)	실패 건수	백분율(%)	실패 건수	백분율(%)
1단	8	66.7	3	33.3	2	33.3
2단	4	33.3	3	33.3	3	50.0
3단 이상			3	33.3	1	16.7
합계	12	100	9	100	6	100

비행실패 구간에 따라 실패가 주로 어느

표 5. 비행구간에 따른 비행실패 원인 분석

	1단 실패		2단 실패		3단이상 실패	
	실패 건수	백분율(%)	실패 건수	백분율(%)	실패 건수	백분율(%)
avionics	4	8.7	4	7.8	6	10.5
electrical	4	8.7	3	5.9	0	0.0
others	2	4.3	1	2.0	0	0.0
propulsion	25	54.3	37	72.5	45	78.9
separation	3	6.5	5	9.8	6	10.5
structural	8	17.4	1	2.0	0	0
합계	46	100	51	100	57	100

서브시스템에서 발생하는지 분석하기 위하여 표 5에 실패 구간별로 실패 서브시스템 통계를 나타내었다. 모든 경우에서 추진시스템의 오작동이 가장 높은 비율을 보이고 있지만 세부적으로 약간의 차이점을 발견할 수 있는데, 1단 비행 실패의 경우 추진 시스템의 실패율이 상단 실패 경우보다 낮고 구조적인 실패 확률이 높아짐을 알 수 있다. 이는 1단 비행 구간이 공기 밀도가 높은 부분이며 또한 최대 동압 구간이 이 구간에 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

III. 결 론

세계 각국의 발사체 개발 과정 및 성공률 등에 대해 살펴보고, 각국에서 최초로 개발된 발사체에 대해 소개하였다. 또한 공개적으로 수집할 수 있는 우주 발사체 실패 사례에 대해 대표적인 몇 가지를 소개하였고, 전체 수집 사례를 주요 기준에 따라 분석함으로써 현재 국내에서 개발 중인 KSLV-I 발사체의 개발 및 KSLV-I의 발사에 적용될 비행안전 시스템의 구성에 참조가 되도록 하였다. 본 결과를 바탕으로 하여, 비행안전 분석에 필요한 비정상 비행모드의 설정이 가능하며, 또한 각 비행구간에서 중점적으로 관측되어야할 서브시스템의 선정도 이루어질 예정이다.

각국의 개발과정을 살펴보면서 미국, 러시아(구소련 포함)를 비롯하여 대부분의 국가들이 우주 발사체를 개발하는 초창기에 많은 어려움을 겪었음을 알 수 있었고, 최초 개발된 발사체들이 대부분 첫 발사에서 실패 하였으며 그 발사체의 전체 성공률도 매우 낮음을 확인 할 수 있었다.

수집된 비행실패 사례를 바탕으로 비행 실패 서브시스템에 대한 분석 결과 전 시대에 걸쳐 추진 시스템의 오작동이 발사 실패의 주요 원인으로 확인되었으며, 이어서 단 분리의 문제 및 전자장비의 오작동 또한 주요한 비행실패 원인으로 파악되었다. 처녀비행만을 대상으로 실패 원인을 분석하였을 때 첫 비행적용의 특성으로 인하여 전자장비 및 구조적인 원인의 비율이 상승함을 알 수 있었다. 러시아 발사체의 경우 전체 사례와 비교하여 비슷한 실패 원인 분포를 보였으며, 추진 시스템의 실패율이 약간 높은 경향을 나타내었다.

실패 구간에 대한 분석에서는 1단보다 2단 이상에서 더 높은 실패 비율을 나타냈으며, 각 구간별로 비행 실패 원인을 분석한 결과 1단에서 실패한 경우 상단 실패의 경우와 비교하여 추진 시스템의 오작동 비율이 낮고 구조적인 실패 확률이 높아짐을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1) I-Shih. Chang, "Overview of World Space launches" AIAA Journal of Propulsion and Power, Vol. 16, No.5(September-October 2000).

2) I-Shih. Chang, S. Toda, S. Kibe, "European Space Launch Failures", AIAA 2000-3574, 36th AIAA Joint Propulsion Conference(Huntsville, AL, July 17-19, 2000).

3) Kehler, C.R., and Starbuck, F.R. *Range Safety Requirements*, Range Safety Office of Patrick Air Force Base, 1997.

4) I-Shih. Chang, "Space Launch Vehicle Reliability" www.aero.org/publications/crosslink/winter2001/03.html.

5) I-Shih. Chang, "Investigation of Space Launch Vehicle Catastrophic Failures", AIAA Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 33, No. 2, 198-205(March-April 1996).

6) I-Shih. Chang, S. Toda, S. Kibe, "Chinese Space Launch Failures", ISTS Paper 2000-g-08, 22nd International Symposium on Space Technology and Science(Morioka, Japan, May 31, 2000).

7) www.astronautix.com.

8) www76.pair.com/tjohnson/lvsum.html.

9) www.russianspaceweb.com/r7.html.

10) J. L. Lions, "Ariane5 Flight 501 Failure" ,July 19 1996.

11) "Launch Successes and Failures, 1957-1999", http://www.aero.org/publications/crosslink/winter2001/03_table_1.html.