

러시아 우주발사체 발사 신뢰성 분석

Launch Reliability Analysis of the Russia Space Launch Vehicle

서윤경*, 공현철, 유일상 (한국항공우주연구원)

1. 서 론

우주발사체 개발은 1957년 구소련의 스푸트닉 위성 발사성공에서 시작되었다. 냉전시대에 미국과 소련의 우주개발 경쟁을 통하여 우주발사체 개발이 본격적으로 시작되었고, 유럽 등 여러 국가에서도 발사체 개발 및 관련 사업을 추진하고 있다. 우주발사체 시스템을 갖추었다고 알려진 나라는 미국, 러시아, ESA(European Space Agency), 중국, 일본, 인도, 이스라엘이 있다. 중국은 2003년도에 우주비행사 양리웨이(Yang Liwei)가 탄 선저우 5호를 발사 성공함으로써 구소련의 1961년 발사, 미국의 1962년 발사를 뛰어넘어 세계 3번째의 유인우주선 발사국이 되었다. 또한 2005년 10월 12일에 간쑤성 주취안 위성 발사기지에서 2명의 우주인이 탑승한 유인우주선 선저우 6호를 발사하였다. 우리나라는 1990년부터 로켓 개발을 시작하여 고체추진 로켓인 KSR-I, KSR-II 개발에 성공하였으며 2002년에 국내 최초로 액체추진 과학로켓인 KSR-III를 독자기술로 개발하여 비행시험에 성공하였다. 현재는 국가 우주개발 중장기 기본계획에 의하여 2007년 발사를 목표로 100kg급 소형위성발사체(KSLV-I) 개발을 진행 중에 있으며, 2015년까지 1.5톤급 실용위성 발사체(KSLV-II) 개발을 계획하고 있다.

우주발사체의 실패란 궁극적으로 탑재체를 원하는 궤도에 올려놓지 못한 것을 의미하며, 여기에는 발사체 자체의 폭발이나 탑재체 수명의 축소, 임무 회복을 위한 많은 노력과 추가되는 비용 등을 포함한다. 우주발사체의 비행 실패는 발사체 및 인공위성의 제작에 투입된 막대한 비용과 시간의 손실, 발사체의 지상추락에 의한 재산 및 인명피해, 대량의 연료에 의한 환경 파괴 및 국가의 위신 하락 등이 수반된다[1].

우주발사체의 비행실패는 우주발사체의 신뢰성과 직접적으로 연결된다. 소모성 우주발사체의 경우 현재 평균 신뢰성은 90%이다. 그러나 재사용 우주발사체는 99%의 신뢰성이 필요하다고 판단되고 있으며, 앞으로 많은 수요가 예상되는 우주여행용 발사체는 100%의 신뢰성 없이는 발사되지 않을 것이다[2]. 이렇게 우주발사체의 신뢰성은 발사서비스 시장의 경쟁력과 연결되기 때문에 매우 중요한 사항이다.

그러므로 현재 우리나라가 추진하고 있는 소형위성 발사체의 신뢰성 확보에 참고가 될 수 있도록 기술협력이 진행 중인 러시아의 우주발사체 실패 사례 및 신뢰성을 분석할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 러시아 발사체를 대상으로 실패 원인 및 발사 횟수에 따른 발

사 신뢰성에 대한 분석을 수행하였다.

2. 러시아 우주발사체 개발 현황

러시아의 우주발사체 개발은 1957년 구소련의 스푸트닉 위성의 발사성공에서 시작되었으며, 이후 미국과 더불어 세계적인 발사체 기술 보유국이 되었다. 세계적으로 1957년부터 2004년까지 4704번의 발사가 이루어졌고, 그중에 2909번은 러시아 발사체로 수행되었다[1]. 러시아의 대표적인 발사체 Soyuz는 통계적으로 세계에서 가장 높은 성공률 96.8%를 기록하고 있다. 러시아(구소련)의 초기 발사체들은 대륙간 탄도미사일(ICBM: Intercontinental Ballistic Missile)의 개념으로 설계되었다. 예를 들어, 러시아 미사일 'R' 시리즈의 하나인 R-7은 러시아 대형 우주발사체 Sputnik, Vostok, Molniya, Soyuz의 기초를 이루었다. 현재 사용되고 있는 대부분의 발사체들도 원래는 군사적인 목적으로만 들어졌던 것이다. 이러한 로켓은 단순함과 신뢰성을 요구하므로 많은 시험과 하드웨어의 지속적인 개량을 통하여 개발된다. 개발 초기에 ICBM과 같은 미사일은 많은 시험 비행(Test Flight)이 이루어졌으나 우주발사체의 경우는 매우 드물게 이루어졌다. Proton 발사체는 1999년에 1회, Start는 1995년에 1회, Rockot의 경우는 1990년부터 2000년까지 4회가 이루어졌을 뿐이다. 또한 Kosmos, Soyuz, Molniya, Vostok 발사체의 경우, 1979년 이후로 한번도 시험 비행을 한 적이 없었다[3]. 물론 많은 우주발사체들이 이러한 ICBM에 기초를 두고 있기 때문에, 목표지점에 대한 정확도를 요구하는 미사일의 특성을 기초로 한 현재 러시아 발사체는 궤도 진입에 대한 정확도가 상당히 높은 편이다[4,5].

3. 러시아 우주발사체 발사 실패

3.1 실패 현황

우주발사체는 1957년부터 2004년까지 전체적으로 4704번이 발사되었고, 404번이 발사실패 하였다. 발사 성공확률은 91.4%이다. 러시아의 경우 1950년대부터 2004년까지 2909번의 발사가 이루어졌으며, 2722번이 성공하였고 발사 성공확률은 93.6%이다[1].

다음 표는 1950년대부터 2004년까지 러시아 우주발사체 중에서 비행 실패 현황을 비교적 구체적으로 알

수 있었던 8개의 발사체 - Kosmos, Proton, Soyuz, Sputnik, Vostok, Molniya, Voskhod, Start - 의 비행 성공/실패율을 나타낸 것이다[3,6].

Table 1. Russia Space Launch Vehicle Successes and Failures (1957-2004)

	Kosmos	Proton	Soyuz	Sputnik	Vostok	Molniya	Voskhod	Start	합계
success	424	276	824	3	146	282	291	5	2251
partial failure	1	1	-	-	-	-	-	-	2
failure	25	33	24	1	17	33	15	1	149
total	450	310	848	4	163	315	306	6	2402

3.2 실패 사례

우주발사체 기술의 해외이전 및 공개는 매우 민감한 사항이다. 왜냐하면, 발사체 기술은 군사적인 용도로 사용될 가능성이 높기 때문이다. 또한 비행 실패는 발사체의 신뢰성과 직접적인 관계에 있고 이는 발사 서비스 시장 경쟁력과 연결되기 때문에, 회사들은 관련 내용에 대한 공개를 꺼려하는 상황이다. 그러므로 실패의 내용이나 원인에 대한 자세한 사항을 찾기는 쉽지 않으나, 공개된 예를 통해 비행 실패에 대한 이해를 돕고자 한다. 이번 사례도 러시아 발사체를 중심으로 한다.

1971년 Proton 발사체는 upper-stage인 Block D의 비행 순서 조정 장치(Sequencer) 프로그램이 잘못되어 두번째 연소 또는 탑재체 분리가 제대로 이루어지지 않았다. 조사 결과에 따르면 연소사이의 coast time이 1.5시간 대신 1.5년으로 되어 있었다.

1996년 Soyuz 발사체에서 페이로드 보호덮개로 인한 사고가 두 번 일어났다. 두 번 모두 페어링 구조안의 유리 강화 플라스틱 층 사이의 접착력이 약했기 때문에 일어난 불완전한 제조 공정 때문이었다.

발사체 발사 실패에는 단지 서브시스템의 결함만이 있는 것은 아니다. 엔지니어들의 기술 부족으로 인한 경우도 발사 실패를 불러온다. 1999년에 발생한 2건의 Proton 발사체 발사 실패는 2건 모두 엔진 공장 엔지니어들의 용접 기능 미숙으로 인하여 오염이 발생되었고, 그 결과 엔진에 불이 붙어 일어났다.

3.3 인명사고 현황

1980년대 이후 러시아의 8종류의 발사체 발사 실패 중에 인명사고가 일어난 경우는 2회로서 1980년 Vostok 발사체, 2002년 Soyuz 발사체의 발사실패이다. 첫 번째 경우는 1980년 Vostok 발사체가 발사 30분 전에 폭발하여 51명의 사람이 사망하였다. 사고조사반은 처음에 3단 연료시스템의 액체 산소 누출을 적절히 방지하지 못한 지상담당 엔지니어들에 대해 질책했으나, 이후에 과산화수소 loading line안에 있던 부적합한 물질이 연료 탱크 안의 과산화수소를 변질 시켰고 이로 인해 폭발이 일어났던 것으로 밝혀졌다. Soyuz 발사체의 경우는 Block D strap-on 부스터의 과산화수소 시스템의 오염으로 발사 후 8-9초 후에 엔진이 작동하지 않았으며 추가적인 폭발로 인하여 사고 수습을 위해 보내졌던 군인 1명이 사망하고 8명이 부상당했

다. 위의 예에서 볼 수 있듯이, 주로 발사전이나 발사 직후 일어나는 사고에서 인명사고가 일어나는 것을 볼 수 있다. 이로써 발사장의 안전시설 강화가 반드시 필요함을 알 수 있다.

4. 러시아 우주발사체 실패사례 분석

4.1 원인별 실패 사례

원인별 실패 사례를 알아보기 위하여 여러 자료들을 조사해 보았으나, 표 1의 실패 원인 149개 중에서 79개의 원인은 알 수 없었다(unknown). 또한 1980년 이전의 unknown의 수는 54개나 되었다. 이러한 이유는 구 소련시절 자국의 실패에 대한 정보를 대내외에 알리지 않았거나, 정확한 사고 조사가 이루어질 수 없었던 이유 때문이라고 생각한다. 그러므로 원인별 실패 분석에서는 실패 원인을 비교적 자세히 알 수 있었던 1980년대부터 2003년 말까지의 기간에 대해서 조사하였다[3,7,8,9]. 발사체의 실패원인으로는 크게 propulsion, structural, avionics, separation, electrical, others, unknown의 7가지로 나누었다. 분석결과를 보면 원인을 알 수 없는 경우를 제외하고는 추진기관의 서브시스템 문제로 인하여 비행이 실패하는 경우가 가장 많았다.

Table 2. Analysis of Launch Failures (1980-2003)

	propulsion	structural	avionics	separation	electrical	others	unknown	합계
Kosmos	1	-	-	-	-	-	8	9
Proton	10	-	3	-	-	-	2	15
Soyuz	1	2	-	-	-	-	12	15
Molniya	4	-	-	-	-	-	3	7
Start	-	-	1	-	-	-	-	1
Vostok	1	-	-	-	-	-	-	1
합계	17	2	4	-	-	-	25	48

4.2 초기 10회 발사 신뢰성

다음은 8개 발사체의 초기 10회 발사 중에 성공률, 실패율 및 이를 통한 신뢰성을 조사하였다. Sputnik은 총 4회, Start는 총 6회 발사만 수행하였으나 내용에 포함시켰다. 초기 10회 발사 성공/실패율을 보면 Voskhod와 Soyuz를 제외한 대부분의 발사체의 성공률이 높지 않음을 알 수 있다. 이는 첫 발사시기를 보았을 때, 러시아(구소련)의 우주발사체 개발이 막 시작된 1950년대 후반과 1960년대 초반이므로 관련 기술의 성숙도 부족 및 경험 부족 때문이라고 생각된다. 그러나 Start 발사체의 경우, 첫 발사가 1993년 임에도 불구하고 83.3%의 발사신뢰성을 보이는 것은 단지 기술의 성숙도나 발사 경험 부족 이외에도 발사체 시스템 관련 프로세스나 각 서브시스템과의 상호 연관성에 따라 많은 변수가 있음을 알 수 있다.

Table 3. Analysis of Vehicle Reliability for the First 10 Launches

	kosmos	proton	soyuz	sputnik	vostok	molniya	voskhod	start
첫발사 년도	1964	1965	1965	1957	1958	1960	1962	1993
success	8	6	9	3	4	2	10	5
failure	2	4	1	1	6	8	0	1
total	10	10	10	4	10	10	10	6
reliability (%)	80	60	90	75	40	20	100	83.3

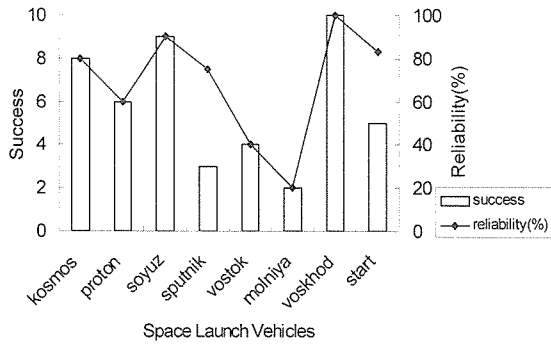


Fig. 1 Vehicle Reliability for the First 10 Launches

4.3 발사 횟수별 신뢰성

각 발사체별로 발사 성공/실패 현황을 50개씩 증가시키면서 발사 신뢰성을 조사하였다. 발사체별로 차이가 있겠지만, 첫 발사 이후 안정된 신뢰성을 확보하는데 얼마만큼의 발사경험이 필요한지 한 눈으로 확인할 수 있었다. 앞에서 분석한 8개의 발사체 중에서 발사 경험이 적은 Sputnik과 Start는 신뢰성 분석에서 제외시켰다. 그림 2를 보면 Proton을 제외하고 대부분의 발사체들이 100~150여회의 발사를 한 이후에야 90%이상의 신뢰성을 확보했음을 알 수 있었다.

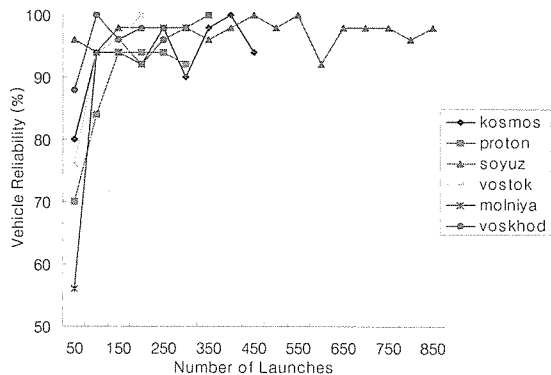


Fig. 2 Vehicle Reliability by Intervals of Fifty

그림 3은 50개 단위로 분석된 신뢰성을 누적시켜 봄으로써 각 발사체들이 서서히 신뢰성을 확보하고 있는 모습을 보인다. 대부분이 90%이상의 신뢰성을 확보하고 있으며, Soyuz는 거의 95%이상의 높은 신뢰성을 유지하는 것을 볼 수 있다.

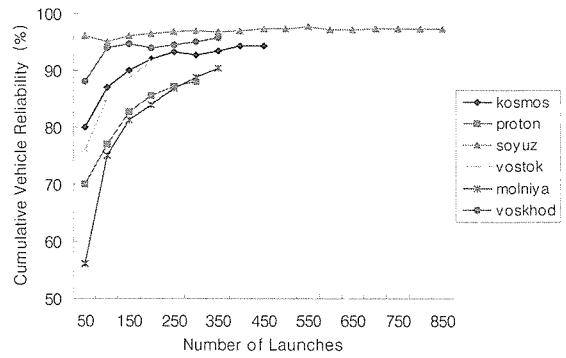


Fig. 3 Vehicle Reliability by Chronological Intervals of Fifty

4.4 연도별 누적 신뢰성

다음은 1958년부터 2003년까지 각 발사체의 연도별 누적 신뢰성을 나타낸 것이다. 6개의 각각의 발사체들이 첫 발사연도, 연도별 발사횟수, 총 발사횟수 등 차이를 갖고 있으나, 처음에 성공률이 저조한 발사체들도 비약적으로 성공률이 높아져 대부분 90% 이상의 신뢰성으로 수렴하는 것을 알 수 있다.

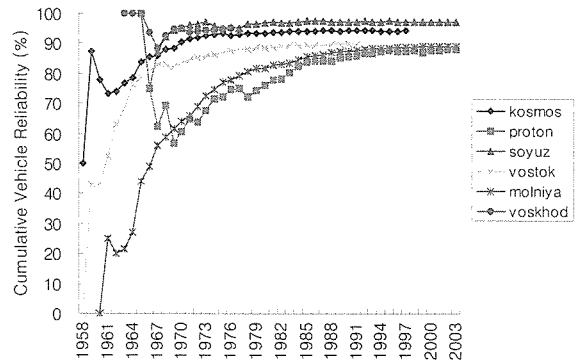


Fig. 4 Vehicle Reliability (1958-2003)

5. 결론

현재 우리나라는 2007년까지 100kg급 위성을 지구 저궤도에 발사할 수 있는 소형위성발사체 (KSLV-I)를 개발하고 있으며, 이어 2015년까지 1.5톤급 위성을 지구 저궤도에 발사할 수 있는 실용위성발사체 (KSLV-II) 개발을 목표로 하고 있다. 우주발사체의 비행 실패에 대한 통계나 원인 조사는 세계적으로 많이 이루어지고 있다. 이에 러시아 우주발사체 중에서 8개의 주요 발사체를 대상으로 비행 실패 원인별, 초기 10회 발사 신뢰성, 50개씩 증가시키면서 발사 신뢰성 분석 및 1958년부터 2003년까지의 연도별 발사 신뢰성을 조사함으로써 우주발사체의 전반적인 발사 신뢰성의 증가 추세를 알 수 있었다.

현재 우리나라에서 추진하고 있는 소형위성발사체 개발사업은 국민의 높은 기대에 따라 반드시 발사 성공해야 하는 상황이다. 그러나 위에서 살펴본 바와 같이 우주발사체 개발은 단 한두 번의 발사로 충분한 기

술을 습득하고 발사 신뢰성을 높일 수 있는 것이 아니다. 우주발사체는 사소한 결함도 발사실패로 이어지는 기술적 무결성에 대한 요구로 많은 위험요소를 안고 있기 때문이다. 그러므로 이와 같은 우주발사체의 특성을 충분히 이해하고 발사 성공을 위한 만반의 준비에 노력을 기울여야 할 것이다.

참고문헌

1. I-Shih Chang, "Space Launch Vehicle Reliability", Crosslink, Spring 2005
2. <http://www.nss.org/forums/vehicles>
3. Steven J. Isakowitz, Joshua B. Hopkins, Joseph P. Hopkins Jr., "International Reference Guide to Space Launch Systems Fourth Edition", AIAA
4. http://www.daviddarling.info/encyclopedia/R/Russian_launch_vehicles.html
5. http://www.esa.int/SPECIALS/ESA_Permanent_Mission_in_Russia/SEMHLZW4QWD_0.html
6. <http://planet4589.org/space/log/launchlog.txt>
7. <http://www.astronautix.com/lvs/orbindex.htm>
8. <http://www.friends-partners.org/partners/mwade/articles/thelures.htm>
9. <http://www.friends-partners.org/partners/mwade/craft/oko.htm>