



해외 무인 달 탐사 실패 사례 분석

양정환¹

Unmanned Lunar Exploration Failure Case Analysis

Jeong-Hwan Yang¹

Korea Aerospace Research Institute

ABSTRACT

The history of mankind's lunar exploration began in 1958 with the United States of America "Pioneer 0" mission. In 1950s~1970s, the United States of America and Union of Soviet Socialist Republics carried out missions and experienced numerous failures to explore the moon. Since the 1990s, Japan, Europe, China and other Advanced country in Space technology have started to explore the moon and in 2016, Korea began to develop the lunar orbiter for lunar exploration. This paper analyzed the failure cases and causes of the lunar exploration in the USA and the USSR in the 1950s~1970s according to the mission purpose. Examples of mission delays, cancel, and failures that occurred during lunar exploration in post-1990s were presented. Through the investigation and analysis, this paper is intended to serve as a reference of the lunar exploration mission that Korea is working on or will be performing in the future.

초 록

인류의 달 탐사 역사는 1958년 미국의 파이오니아 0호 임무로 시작되었다. 이후 1950~1970년대 미국과 구소련 2개국이 수많은 실패를 겪으며 달 탐사 임무를 수행하였다. 1990년대 이후로 일본, 유럽, 중국 등 우주선진국들이 달 탐사를 수행하기 시작했고, 우리나라도 2016년부터 달 탐사를 위한 달 궤도선을 개발하기 시작했다. 본 논문은 1950~1970년대 미국과 구소련의 달 탐사의 실패 사례 및 원인을 임무목적에 따라 분석하였고, 1990년대 이후 우주선진국들의 달 탐사 수행 시 발생한 사업지연, 사업중단, 임무실패 등의 사례를 제시하였다. 본 논문에서 조사 및 분석한 사례를 통해 우리나라가 진행 중이거나 향후 진행하게 될 달 탐사 임무수행에 참조가 되고자 한다.

Key Words : Lunar(달), Exploration(탐사), Failure(실패), Delay(지연), Cancel(취소)

1. 서 론

인류의 달 탐사는 1950년대 냉전시기 미국과 구소련의 우주경쟁의 일환으로 시작되었다. 1958년 8월 17일 미국은 파이오니아 0호(Pioneer 0) 임무를 통해

달 궤도선 에이블 1호(Able 1)를 발사하여 세계 최초로 달 탐사를 시작하였지만 임무목표 달성은 실패하였고, 뒤이어 1958년 9월 23일 구소련도 루나(Luna) 임무를 통해 달 충돌선 Ye-1을 발사하였지만 임무목표 달성은 실패하였다. 이후 1959년 9월 12일 구소련

† Received : November 11, 2019 Revised : February 24, 2020 Accepted : February 27, 2020

¹ Senior Researcher

¹ Corresponding author, E-mail : yangjh@kari.re.kr

이 달 충돌선 임무 루나 2호(Luna 2)를 성공하여 세계 최초로 무인 달 탐사에 성공한다. 1976년 구소련의 달 탐사 중단전까지 미국은 32회, 구소련은 57회의 임무를 경쟁적으로 수행하면서 수많은 실패를 딛고 우주기술을 진보시켰다. 70년대 이후 달 탐사는 세계적으로 중단되었다가 90년대 일본을 시작으로, 유럽, 중국, 인도 등 우주선진국들이 달 탐사를 수행하기 시작했고 미국도 달 탐사를 재개하였다. 우리나라도 2016년부터 달 탐사를 위한 달 궤도선을 개발하고 있다.

1958~1976년까지 미국과 구소련 2개국만 수행한 달 탐사 임무 횟수는 89회로 매우 많지만 36회만 성공하여 성공률은 40% 수준으로 낮았다. 1990년부터 현재까지 미국을 포함한 우주선진국들은 18회 중 16회 임무를 성공하여 성공률은 높지만 사업 지연, 사업 중단, 임무조기 종료 등 어려움을 겪으며 달 탐사를 수행하고 있다.

본 논문에서는 해외 각국의 달 탐사 실패 및 지연 등의 사례를 분석하여 우리나라에서 수행 중인 달 궤도선 임무와 향후 수행하게 될 달 탐사에 참조가 되고자 한다.

II. 본 론

실패원인 및 사업지연 등의 정보는 각국에서 공식적으로 발표하는 경우는 많지 않다. 본 논문에서는 NASA에서 집계한 실패사례 및 언론공개 자료를 인용하여 각국의 달 탐사 실패사례를 분석하고, 사업지연 및 중단 사례를 소개하였다. 임무횟수가 많은 미국과 구소련은 임무목적에 따라 실패사례를 분석하였다. 실패사례 분석을 위해 실패원인을 발사체와 우주선으로 구별하고 발사체 및 우주선의 실패원인을 Propulsion, Structural, Avionics, Separation, Electrical, Others, Unknown 등 7가지로 구분하였다[1].

1. Propulsion : 엔진, 추력기, 연소실, 터보펌프, 산화제 및 추진제, 점화장치 등
2. Structural : 내부구조, 외피 등
3. Avionics : 컴퓨터, 비행 및 유도 제어장치, 가속도계, 자세센서, 내부 측정 장치 등
4. Separation : 단 및 페어링 분리 장치 등
5. Electrical : 전원공급장치, 전기연결배선 등
6. Others : 지상시스템, 인적오류 등
7. Unknown : 실패원인을 알 수 없을 때

2.1 미국의 무인 달 탐사

미국은 1958년~2013년까지 총 39회의 무인 달 탐사 임무를 수행하였다. 39회 중 24회의 임무를 성공하여 성공률은 62% 수준이다. 실패원인은 발사체 10건, 우주선 5건이며, 발사체 실패원인은 Propulsion 6건, Avionics 2건, Structural 1건, Electrical 1건으로

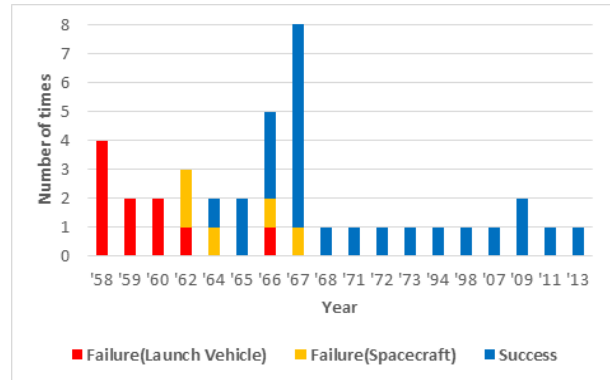


Fig. 1. USA Unmanned lunar exploration result

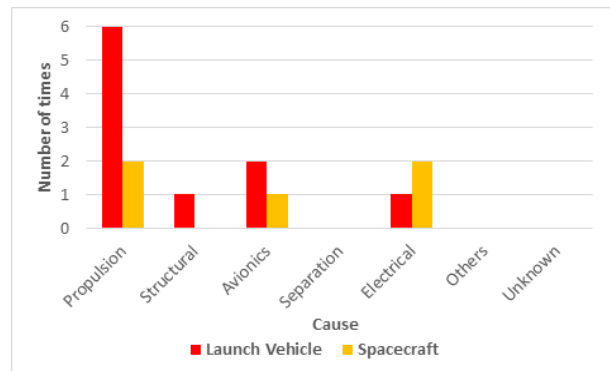


Fig. 2. USA Unmanned lunar exploration failure cause classification

Propulsion 문제가 가장 많았고, 우주선 실패원인은 Electrical 2건, Propulsion 2건, Avionics 1건으로 비등하였다. 미국의 무인 달 탐사 연도별 실적과 실패원인분류를 각각 Figs. 1, 2에 나타내었다.

대부분의 실패는 1958~1964년 개발초기에 발생하였다. 이 시기에 12개 임무를 연속으로 실패(일부성공)하였고, 실패(일부성공)원인은 발사체 9건, 우주선 3건으로 발사체 문제로 대부분의 임무를 실패하였다 [2]. 발사체 실패원인은 Propulsion 5건, Avionics 2건, Structural 1건, Electrical 1건으로 Propulsion 문제가 대부분이었고, 우주선 실패원인은 Electrical 2건, Avionics 1건이었다. 1964년~2013년까지는 개발 초기 실패를 통해 축적된 경험과 지식을 바탕으로 27개 중 24개 임무를 성공하였다. 이 시기의 실패(일부성공)원인은 발사체 1건, 우주선 2건으로 발사체는 기술적으로 안정되었음을 알 수 있다. 이 시기의 발사체와 우주선 실패원인은 모두 Propulsion이었다.

미국의 무인 달 탐사는 목적에 따라 달 궤도선, 달 근접비행, 달 충돌선, 달 착륙선 등 4개로 분류할 수 있다. 임무목적에 따라 실패 사례를 소개한다.

2.1.1 달 궤도선

달 궤도선은 달 주위를 돌며 달을 관측하는 임무를 수행한다. 달 궤도선 임무는 1958년부터 2013년까

지 23회 수행되었다. 개발초기인 1958년부터 1966년까지 7번의 연속된 실패(일부성공) 후 16개의 임무를 연속으로 성공하여 성공률은 70% 수준이다. 실패(일부성공)는 모두 발사체 문제로 발생했으며, 발사체 실패원인은 Propulsion 4건, Structural 1건, Electrical 1건, Avionics 1건이었다. 미국의 달 궤도선 임무 실적을 Table 1에 정리하였다.

실패 1(발사체) : 발사체 1단 터보펌프의 기어박스 고장으로 발사 후 73.6초에 고도 15.2km에서 폭발.

실패 2(발사체) : 부정확한 밸브설정으로 가속도에 오류가 발생하여 발사체 2단이 10초 일찍 정지.

실패 3(발사체) : 전선결선으로 발사체 3단 분리 시 엔진이 점화되지 않음.

실패 4(발사체) : 노즈페어링의 섬유유리덮개가 발사 후 고도상승으로 인한 압력차를 견디지 못하고 발사 45초 만에 깨짐.

실패 5(발사체) : 산화제시스템의 고장으로 발사체 2단이 비정상적으로 점화되었고 조기에 정지.

실패 6(발사체) : 발사체 1단이 동작하는 동안 발사체 상단이 조기에 점화됨.

일부성공 1(발사체) : 발사체 2단이 너무 빠르게 가속되어 달 궤도 진입이 불가능.

Table 1. USA Unmanned lunar exploration result (Lunar Orbit)

	Mission	Spacecraft	Launch Vehicle	Launch Date	Result
1	Pioneer 0	Able 1	Thor Able I	'58.08.17	Failure1 (Launcher)
2	Pioneer	Able 2	Thor Able I	'58.10.11	Failure2 (Launcher)
3	Pioneer II	Able 3	Thor Able I	'58.11.08	Failure3 (Launcher)
4	Pioneer, P-3	P-3/ Able IVB	Atlas Able	'59.11.26	Failure4 (Launcher)
5	Pioneer, P-30	P-30/ Able VA	Atlas Able	'60.09.25	Failure5 (Launcher)
6	Pioneer, P-31	P-31/ Able VB	Atlas Able	'60.12.15	Failure6 (Launcher)
7	Explorer XXXIII	AIMP-D	Thor Delta E1	'66.07.01	Partial success1 (Launcher)
8	Lunar Orbiter I	LO-A	Atlas Agena D	'66.08.10	Success
9	Lunar Orbiter II	S/C 5	Atlas Agena D	'66.11.06	Success
10	Lunar Orbiter III	S/C 6	Atlas Agena D	'67.02.05	Success
11	Lunar Orbiter IV	S/C 7	Atlas Agena D	'67.05.04	Success
12	Explorer XXXV	AIMP-E	Thor Delta E1	'67.07.19	Success
13	Lunar Orbiter V	S/C 3	Atlas Agena D	'67.08.01	Success

14	Apollo 15 Particle & Fields SubSat	-	Saturn V	'71.08.04	Success
15	Apollo 16 Particle & Fields SubSat	-	Saturn V	'72.04.24	Success
16	Explorer 49	RAE-B	Delta 1913	'73.06.10	Success
17	Clementine	Clementine	Titan IIG	'94.01.25	Success
18	Lunar Prospector	Lunar Prospector	Athena 2	'98.01.07	Success
19	Artemis P1, Artemis P2	THEMIS B, THEMIS C	Delta 7925-10C /D323	'07.02.17	Success
20	Lunar Reconnaissance Orbiter	LRO	Atlas V 401	'09.06.18	Success
21	Lunar Crater Observation and Sensing Satellite	LCROSS	Atlas V 401	'09.06.18	Success
22	Ebb, Flow	GRAIL-A, GRAIL-B	Delta 7920H-10	'11.09.10	Success
23	LADEE	LADEE	Minotaur V	'13.09.07	Success

2.1.2 달 근접비행

달 근접비행은 달 가까이에 접근하여 달과 우주환경을 관측하는 임무이다. 1958년부터 1959년까지 달 근접비행 임무를 2회 수행하였고 1회 실패, 1회 일부 성공 하였다. 실패(일부성공) 원인은 모두 발사체 Propulsion이었다. 미국의 달 근접비행 임무 실적을 Table 2에 정리하였다.

실패 1(발사체) : 추진제 조기 고갈로 주 부스터 엔진이 계획보다 4초 일찍 정지.

일부성공 1(발사체) : 발사체 2단 엔진이 제때에 정지하지 않아 궤도의 방위각 및 양각 변화.

Table 2. USA Unmanned lunar exploration result (Lunar Flyby)

	Mission	Spacecraft	Launch Vehicle	Launch Date	Result
1	Pioneer III	-	Juno II	'58.12.06	Failure1 (Launcher)
2	Pioneer IV	-	Juno II	'59.03.03	Partial Success1 (Launcher)

2.1.3 달 충돌선

달 충돌선은 달을 관측한 후 달 표면에 충돌하여 달 표본을 분석하는 임무를 수행한다. 1962년부터 1965년까지 7회 중 3회 성공하여 성공률은 43% 수준이다. 실패(일부성공)원인은 발사체 1건, 우주선 3건 이었고, 발사체 실패원인은 Avionics, 우주선 실패원인은 Electrical 2건, Avionics 1건이었다. 미국의 달 충돌선 임무 실적을 Table 3에 정리하였다.

실패 1(발사체) : 트랜지스터 결함으로 발사체 유도 시스템이 오작동하여, 우주선이 과도한 속도로 달 전이 궤도에 투입.

일부성공 1(우주선) : 중앙 컴퓨터와 시퀀서의 전원 고장으로 우주선의 Master Clock이 정지되어 태양 전지판 전개 등 계획한 임무를 수행하지 못함.

일부성공 2(우주선) : 정상동작 후 15분 만에 오작동으로 태양전지 동작이 멈추고 8시간 후에 배터리 전원이 고갈.

일부성공 3(우주선) : 발사체 부스터 분리 중 TV 카메라 패키지의 전원공급 장치에 단락발생.

Table 3. USA Unmanned lunar exploration result (Lunar Impact)

	Mission	Spacecraft	Launch Vehicle	Launch Date	Result
1	Ranger III	P-34	Atlas-Agena B/3	'62.01.26	Failure1 (Launcher)
2	Ranger IV	P-35	Atlas-Agena B/4	'62.04.23	Partial Success1 (Spacecraft)
3	Ranger V	P-36	Atlas-Agena B/7	'62.10.18	Partial Success2 (Spacecraft)
4	Ranger VI	Ranger-A/P-53	Atlas-Agena B/8	'64.01.30	Partial Success3 (Spacecraft)
5	Ranger VII	Ranger-B/P-54	Atlas-Agena B/9	'64.07.28	Success
6	Ranger VIII	Ranger-C	Atlas-Agena B/13	'65.02.17	Success
7	Ranger IX	Ranger-D	Atlas-Agena B/14	'65.03.21	Success

2.1.4 달 착륙선

1966년부터 1968년까지 7회 중 5회 성공하여 성공률은 71% 수준이다. 실패원인은 모두 우주선의 Propulsion이었다. 미국의 달 착륙선 임무 실적을 Table 4에 정리하였다.

실패 1(우주선) : 달을 향하는 동안 추진기 3개 중 하나가 중간코스 조정(9.8초간)을 위한 점화에 실패.

실패 2(우주선) : 달 착륙 2분 30초 전, 역추진로켓 정지 2초 전 통신 두절. NASA는 고체추진제 역추진로켓이 폭발해 우주선이 파괴되었다고 추정.

Table 4. USA Unmanned lunar exploration result (Lunar Landing)

	Mission	Spacecraft	Launch Vehicle	Launch Date	Result
1	Surveyor I	Surveyor-A	Atlas Centaur/10	'66.05.30	Success
2	Surveyor II	Surveyor-B	Atlas Centaur/7	'66.09.20	Failure1 (Spacecraft)
3	Surveyor III	Surveyor-C	Atlas Centaur/12	'67.04.17	Success
4	Surveyor IV	Surveyor-D	Atlas Centaur/11	'67.07.14	Failure2 (Spacecraft)
5	Surveyor V	Surveyor-E	Atlas Centaur/13	'67.09.08	Success
6	Surveyor VI	Surveyor-F	Atlas Centaur/14	'67.11.07	Success
7	Surveyor VII	Surveyor-G	Atlas Centaur/15	'68.01.07	Success

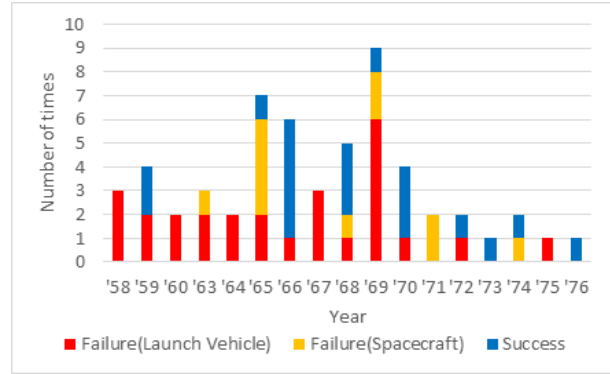


Fig. 3. USSR Unmanned lunar exploration result

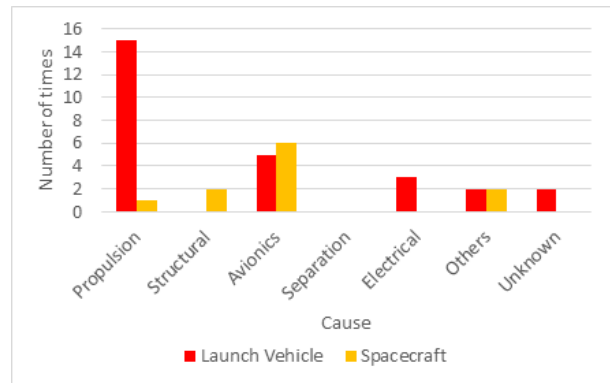


Fig. 4. USSR Unmanned lunar exploration failure cause classification

2.2 구소련의 무인 달 탐사

구소련은 1958년부터 1976년까지 무인 달 탐사를 수행하였고 전체 성공률은 33% 수준으로 57개 중 38개 임무를 실패 또는 일부성공 하였다. 실패(일부 성공)한 38개 임무 중 발사체 실패가 27개, 우주선 실패가 11개였다[2]. 발사체 실패원인은 Propulsion 15건, Avionics 5건, Electrical 3건, Others 2건, Unknown 2건으로 Propulsion이 대부분이었다. 우주선 실패원인은 Avionics 6건, Structural 2건, Others 2건, Propulsion 1건이었다. 구소련의 무인 달 탐사 연도별 실적과 실패 원인분류를 각각 Figs. 3, 4에 나타내었다.

무인 달 탐사 시작해인 1958년부터 1975년까지 계속하여 발사체 실패를 겪으며 결국 미국과의 우주경쟁에서 뒤처지고 1976년 이후로 달 탐사 임무를 수행하지 않았다.

구소련의 무인 달탐사는 목적에 따라 달 충돌선, 달 근접비행, 달 착륙선, 달 궤도선, 월면차, 달표본채취, 달궤도 선회비행 등 7개로 분류할 수 있다. 각 목적에 따라 실패사례를 분석한다.

2.2.1 달 충돌선

1958년부터 1959년까지 6회 중 1회 성공하여 성공률은 16% 수준이다. 5회의 임무실패 원인은 모두 발

사체였다. 발사체 실패원인으로는 Propulsion 3건, Avionics 1건, Others(지상 설정오류) 1건이었다. 구 소련의 달 충돌선 임무 실적을 Table 5에 정리하였다.

실패 1,2(발사체) : 보조부스터 엔진연소실의 압력 진동과 발사체 축방향진동(POGO현상)으로 폭발.

실패 3(발사체) : 발사체 주 엔진의 과산화수소 펌프의 진공상태 변화로 엔진 정지.

일부성공(발사체) : 발사체에 유도정보를 전송하는 지상안테나의 오류로 발사체 상단이 긴 시간 연소.

실패 4(발사체) : 관성유도시스템의 자이로스코프에 고장이 발생하여 지상 명령으로 폭발시킴.

Table 5. USSR Unmanned lunar exploration result (Lunar Impact)

	Mission	Spacecraft	Launch Vehicle	Launch Date	Result
1	Luna	Ye-1	Luna	'58.09.23	Failure1 (Launcher)
2	Luna	Ye-1	Luna	'58.10.11	Failure2 (Launcher)
3	Luna	Ye-1	Luna	'58.12.04	Failure3 (Launcher)
4	Soviet Space Rocket [Luna 1]	Ye-1	Luna	'59.01.02	Partial Success (Launcher)
5	Luna	Ye-1A	Luna	'59.06.18	Failure4 (Launcher)
6	Second Soviet Space Rocket [Luna 2]	Ye-1A	Luna	'59.09.12	Success

2.2.2 달 근접비행

달을 촬영하기 위한 달 근접비행은 1959년부터 1965년까지 4회 중 2회 성공하여 성공률은 50% 수준이다. 2회의 임무실패 원인은 모두 발사체 Propulsion 이었다. 구소련의 달 근접비행 임무 실적을 Table 6에 정리하였다.

실패 1(발사체) : 발사체 3단 엔진의 조기 정지.

실패 2(발사체) : 발사 10초 후 발사체 엔진 분리.

Table 6. USSR Unmanned lunar exploration result (Lunar Flyby)

	Mission	Spacecraft	Launch Vehicle	Launch Date	Result
1	Automatic Interplanetary Station [Luna 3]	Ye-2A	Luna	'59.10.04	Success
2	Luna	Ye-3	Luna	'60.04.15	Failure1 (Launcher)
3	Luna	Ye-3	Luna	'60.04.19	Failure2 (Launcher)
4	Zond 3	3MV-4	Molniya	'65.07.18	Success

2.2.3 달 착륙선

1963년부터 1966년까지 13회 중 2회 성공하여 성공률은 15% 수준이다. 발사체 문제로 6회, 우주선 문제로 5회 실패하였다. 발사체 실패원인은 Electrical 3건, Propulsion 2건, Avionics 1건이었고, 우주선 실패원인은 Avionics 3건, Structural 1건, Others(인적 오류) 1건이었다. 구소련의 달 착륙선 임무 실적을 Table 7에 정리하였다.

실패 1(발사체) : 제어시스템 I-100 전류 컨버터의 고장으로 발사체 상단(Blok L) 엔진점화 실패.

실패 2(발사체) : 제어시스템 I-100이 부정확한 정보를 부스터의 궤도 제어시스템에 전달하여 발사체가 자세제어에 실패.

실패 3(우주선) : 열제어시스템 원인으로 추정되는 항법시스템의 고장으로 자세제어에 실패.

실패 4(발사체) : 발사체 3단 엔진의 주 액화산소밸브 고장으로 엔진 조기 정지.

실패 5(발사체) : 발사체 3단 엔진에 전력을 공급하는 배터리와 I-100 제어시스템의 회로고장으로 전력 손실이 발생하여 3단(Blok I) 엔진이 조기 정지.

실패 6(발사체) : 우주선 I-100 제어시스템의 전력 컨버터에 단락이 발생하여 달 천이 궤도 진입을 위한 Blok L 상단 엔진 점화가 실패한 것으로 추정.

실패 7(발사체) : (이전에 대부분의 실패원인이었던 I-100 제어 시스템을 수정함. 이전에 상단 (Blok L)과 우주선을 모두 제어했으나, 상단과 우주선을 개별로 제어함.) 발사체 3단(Blok I)의 액화산소탱크의 질소 파이프의 감압으로 3단 엔진 점화실패.

실패 8(우주선) : I-100 제어시스템의 자이로스코프를 자세제어에 이용하기 위한 준비시간이 너무 짧아 우주선이 회전하며 자세제어에 실패.

실패 9(우주선) : 착륙 시 역추진 엔진을 정지시키는 타이머에 명령이 인적 오류로 잘못 전송되어 엔진이 오랫동안 동작하였고 우주선은 달을 지나쳐감.

실패 10(우주선) : 우주선의 천문항법시스템의 광센서가 잘못된 각도로 설정되어 중요 궤도조정 시 자세제어에 실패.

실패 11(우주선) : 우주선이 착륙할 때 펼친 에어백 2개 중 하나가 플라스틱 마운팅 브라켓에 찢려 터지면서 우주선이 회전하며 자세제어에 실패.

Table 7. USSR Unmanned lunar exploration result (Lunar Landing)

	Mission	Spacecraft	Launch Vehicle	Launch Date	Result
1	Luna	Ye-6	Molniya	'63.01.04	Failure1 (Launcher)
2	Luna	Ye-6	Molniya	'63.02.03	Failure2 (Launcher)
3	Luna 4	Ye-6	Molniya	'63.04.02	Failure3 (Spacecraft)

4	Luna	Ye-6	Molniya-M	'64.03.21	Failure4 (Launcher)
5	Luna	Ye-6	Molniya-M	'64.04.20	Failure5 (Launcher)
6	Kosmos 60 [Luna]	Ye-6	Molniny	'65.03.12	Failure6 (Launcher)
7	Luna	Ye-6	Molniya-M	'65.04.10	Failure7 (Launcher)
8	Luna 5	Ye-6	Molniya-M	'65.05.09	Failure8 (Spacecraft)
9	Luna 6	Ye-6	Molniya-M	'65.06.08	Failure9 (Spacecraft)
10	Luna 7	Ye-6	Molniya-M	'65.10.04	Failure10 (Spacecraft)
11	Luna 8	Ye-6	Molniya-M	'65.12.03	Failure11 (Spacecraft)
12	Luna 9	Ye-6M	Molniya-M	'66.01.31	Success
13	Luna 13	Ye-6M	Molniya-M	'66.12.21	Success

2.2.4 달 궤도선

1966년부터 1974년까지 12회 중 5회 성공하여 성공률은 42% 수준이다. 발사체 문제로 6회, 우주선 문제로 1회 실패하였다. 발사체 실패원인은 Propulsion 4건, Avionics 1건, Unknown 1건이었고, 우주선 실패원인은 Avionics 1건이었다. 구소련의 달 궤도선 임무 실적을 Table 8에 정리하였다.

실패 1(발사체) : 발사체 상단(Blok L)의 자세제어와 엔진점화 실패.

일부성공 1(발사체) : 발사체 상단(Blok L)이 조기 정지되어 우주선이 낮은 궤도에 진입.

실패 2(발사체) : 과도한 연료소비율로 발사체 3단(Blok I) 엔진이 초기에 정지.

실패 3(발사체) : 연료압력측정 파이프가 부서지면서 발사체 엔진에 화재 발생.

실패 4(발사체) : 이물질이 발사체 1단 엔진의 산화제 펌프에 들어가 폭발이 발생한 것으로 추정.

일부성공 2(우주선) : 자이로플랫폼의 실패로 우주선이 계획 보다 높은 궤도에 진입하여 고해상도 촬영 임무와 무선 고도계를 사용하는 임무를 취소.

실패 5(발사체) : 이륙 후 발사체 1단이 분리되기 몇 초전 발사체 1단 하단에서 원인을 알 수 없는 강한 폭발 발생.

Table 8. USSR Unmanned lunar exploration result (Lunar Orbit)

	Mission	Spacecraft	Launch Vehicle	Launch Date	Result
1	Kosmos 111 [Luna]	Ye-6S	Molniya-M	'66.03.01	Failure1 (Launcher)
2	Luna 10	Ye-6S	Molniya-M	'66.03.31	Success
3	Luna 11	Ye-6LF	Molniya-M	'66.08.24	Success
4	Luna 12	Ye-6LF	Molniya-M	'66.10.22	Success

5	Kosmos 159 [Luna]	Ye-6LS	Molniya-M	'67.05.16	Partial Success1 (Launcher)
6	Luna	Ye-6LS	Molniya-M	'68.02.07	Failure2 (Launcher)
7	Luna 14	Ye-6LS	Molniya-M	'68.04.07	Success
8	N1	7K-L1S	N1	'69.02.21	Failure3 (Launcher)
9	N1	7K-L1S	N1	'69.07.03	Failure4 (Launcher)
10	Luna 19	Ye-8LS	Proton-K	'71.09.28	Partial Success2 (Spacecraft)
11	N1	7K-LOK	N1	'72.11.23	Failure5 (Launcher)
12	Luna 22	Ye-8LS	Proton-K	'74.05.29	Success

2.2.5 달궤도 선회비행

달궤도 선회비행은 달의 궤도를 따라 돌고난 후 지구에 재진입하는 임무로 1967년부터 1970년까지 8회 중 4회 성공하여 성공률은 50% 수준이다. 실패원인은 발사체 3건, 우주선 1건이며, 발사체 실패원인은 Propulsion 2건, Unknown 1건, 우주선 실패원인은 Others(탑재체 이상신호) 1건이었다. 구소련의 달 궤도 선회비행 임무 실적을 Table 9에 정리하였다.

실패 1(발사체) : 발사 61초에 발사체가 정상궤도를 이탈하여 비상구조시스템을 작동시킴.

실패 2(발사체) : 엔진노즐의 파손으로 발사체 2단의 4개 엔진중 하나가 점화에 실패함.

실패 3(우주선) : 탑재체에서 발생한 이상신호로 인해 발사체 2단 엔진이 갑자기 정지함.

실패 4(발사체) : 발사체 2단의 4개 엔진 중 하나가 갑자기 정지했고 나머지 엔진은 연소했으나, 연료가스발생기에 연결된 파이프라인의 고장으로 3단 엔진도 초기에 정지함.

Table 9. USSR Unmanned lunar exploration result (Circumlunar flight)

	Mission	Spacecraft	Launch Vehicle	Launch Date	Result
1	Zond	7K-L1	Proton-K	'67.09.27	Failure1 (Launcher)
2	Zond	7K-L1	Proton-K	'67.11.22	Failure2 (Launcher)
3	Zond	7K-L1	Proton-K	'68.04.22	Failure3 (Spacecraft)
4	Zond 5	7K-L1	Proton-K	'68.09.14	Success
5	Zond 6	7K-L1	Proton-K	'68.11.10	Success
6	Zond	7K-L1	Proton-K	'69.01.20	Failure4 (Launcher)
7	Zond 7	7K-L1	Proton-K	'69.08.07	Success
8	Zond 8	7K-L1	Proton-K	'70.10.20	Success

2.2.6 월면차

1969년부터 1973년까지 3회 중 2회 성공하여 성공률은 66%수준이다. 실패원인은 우주선 Structural 문제였다. 구소련의 월면차 임무 실적을 Table 10에 정리하였다.

실패 1(우주선) : 발사체가 상승하는 동안 가해지는 압력에 탑재체가 손상되고 부스터 폭발.

Table 10. USSR Unmanned lunar exploration result (Lunar Rover)

	Mission	Spacecraft	Launch Vehicle	Launch Date	Result
1	Luna/Lunokhod	Ye-8	Proton-K	'69.02.19	Failure1 (Spacecraft)
2	Luna 17, Lunokhod 1	Ye-8	Proton-K	'70.11.10	Success
3	Luna 21, Lunokhod 2	Ye-8	Proton-K	'73.01.08	Success

2.2.7 달표본 채취

1969년부터 1976년까지 11회 중 3회 성공하여 성공률은 27% 수준이다. 실패원인은 발사체 5건, 우주선 3건으로 발사체 실패원인은 Propulsion 2건, Avionics 2건, Others(잘못된 명령) 1건이었고, 우주선 실패원인은 Avionics 2건, Propulsion 1건이었다. 구소련의 달표본 채취 임무 실적을 Table 11에 정리하였다.

실패 1(발사체) : 발사체 4단(Blok D)의 유도시스템 회로가 파괴되어 점화 실패.

실패 2(우주선) : 달 착륙 시 부정확한 자세에서 엔진이 점화.

실패 3(발사체) : 발사체 4단(Blok D) 1차 점화 시 연료주입밸브가 고착되어, 달 천이 궤도 투입을 위한 두 번째 점화에 실패.

실패 4(발사체) : 발사체 4단(Blok D)에 점화 명령을 내리는 무선 명령 프로그램 오류로 달 천이 궤도 투입을 위한 엔진 점화 실패.

실패 5(발사체) : 발사 후 127초에 발사체 2단 엔진이 잘못된 명령으로 정지되었고 발사체는 파괴됨.

실패 6(우주선) : 달 착륙을 위한 엔진이 비정상적으로 동작하여 자세제어에 실패하여 달 착륙에 실패.

실패 7(우주선) : 달 착륙 시 130m 높이에서는 모든 고도 측정이 중단되어 경착륙하였고 우주선의 장비가 손상되어 임무에 실패.

실패 8(발사체) : 지구 궤도 투입을 위한 발사체 4단(Blok D)의 엔진점화 실패.

Table 11. USSR Unmanned lunar exploration result (Lunar Sample Return)

	Mission	Spacecraft	Launch Vehicle	Launch Date	Result
1	Luna	Ye-8-5	Proton-K	'69.06.14	Failure1 (Launcher)

2	Luna 15	Ye-8-5	Proton-K	'69.07.13	Failure2 (Spacecraft)
3	Kosmos 300 [Luna]	Ye-8-5	Proton-K	'69.09.23	Failure3 (Launcher)
4	Kosmos 305 [Luna]	Ye-8-5	Proton-K	'69.10.22	Failure4 (Launcher)
5	Luna	Ye-8-5	Proton-K	'70.02.06	Failure5 (Launcher)
6	Luna 16	Ye-8-5	Proton-K	'70.09.12	Success
7	Luna 18	Ye-8-5	Proton-K	'71.09.02	Failure6 (Spacecraft)
8	Luna 20	Ye-8-5	Proton-K	'72.02.14	Success
9	Luna 23	Ye-8-5M	Proton-K	'74.10.28	Failure7 (Spacecraft)
10	Luna	Ye-8-5M	Proton-K	'75.10.16	Failure8 (Launcher)
11	Luna 24	Ye-8-5M	Proton-K	'76.08.09	Success

2.3 이스라엘, 인도, 일본, 중국 달 탐사

1950~1970년대 미국과 구소련의 우주경쟁 이후 1990년대부터 다른 우주선진국들도 달 탐사 임무를 수행하기 시작했다. 1990년부터 2019년까지 이스라엘은 1회, 인도는 2회, 일본은 2회, 중국은 5회, 유럽은 1회 달

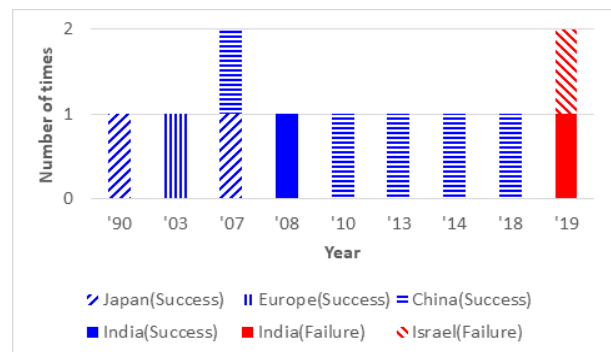


Fig. 5. Advanced country in Space technology Unmanned lunar exploration result since 1990s

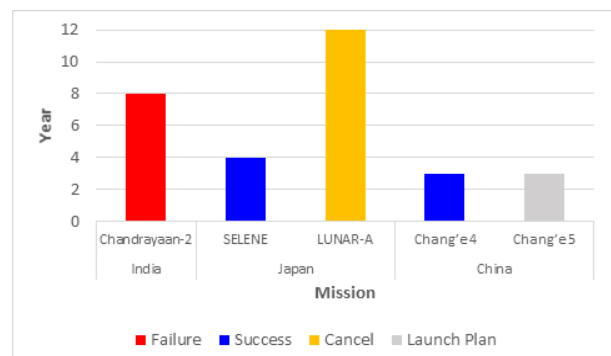


Fig. 6. Advanced country in Space technology Unmanned lunar exploration delay since 1990s

탐사를 수행하였다. 미국 및 구소련과 같이 발사체 실패로 인한 임무실패는 없었고, 우주선으로 인한 임무실패 2건이 발생하였다. 우주선 실패 원인은 Avionics 2회였다. 이밖에도 사업지연 4회, 사업지연 및 중단 1회, 임무조기종료 1회 발생하였다. 사업지연 원인은 국제협력 문제 1건, 임무변경 1건, 발사체 개발지연 2건이었고, 사업중단 원인은 탑재체 개발 문제였으며, 임무조기종료 원인은 우주선의 Electrical 문제였다. 1990년대 이후 우주선진국의 무인 달 탐사 연도별 실적과 실패 원인분류를 각각 Figs. 5, 6에 나타내었고, 실적을 Table 12에 정리하였다.

2.3.1 이스라엘

2019년 비영리 민간단체 SpaceIL이 달 착륙선을 발사하였으나, 우주선의 Avionics 문제로 실패했다. 달에 착륙하는 동안 Avionics의 관성측정장치에 문제가 발생하였고, 지상에서 관성측정장치의 문제를 해결하고자 재부팅하였다. 그러나 재부팅 조치가 On-board 컴퓨터의 재설정으로 연결되면서 문제가 확산되어 결국 주 엔진이 정지하였다. 우주선의 고장진단 및 복구 시스템 설계 시 면밀한 검토가 있었다면, 관성측정장치의 재부팅이 On-board 컴퓨터 재부팅으로 연결되면서 확산된 실패는 방지할 수 있었을 것으로 예상된다. 또한 '74년 구소련에서 발사한 루나 23호(Luna 23)도 달에 착륙하는 동안 측정계의 문제로 달 착륙에 실패한 것으로 보아, 향후 달 착륙선 설계 시 달에 착륙하는 동안 측정계에서 발생할 수 있는 문제에 대한 철저한 대비가 필요한 것으로 판단된다.

실패(우주선) : 달 착륙선 베레시트(Beresheet)는 달 착륙 중 15km지점에서 관성측정장치(IMU)에 이상발생. 지상에서 관성측정장치를 재부팅하는 명령을 전송하였으나, 의도치 않게 우주선의 On-board 컴퓨터가 재설정(Reset)되면서 주 엔진 정지. 재설정 완료 후 주 엔진이 다시 동작하였지만, 우주선이 달 지표면과 너무 가까워 착륙을 위해 속도를 줄이기는 불가능했고, 달 지표면에 빠른 속도로 충돌[3].

2.3.2 인도

2008년부터 2019년까지 달 궤도선 임무를 1회, 달 착륙 임무를 1회 수행하였다. 달 궤도선 임무는 성공하였으나 설계수명보다 일찍 임무가 종료되었고, 달 착륙 임무는 8년 지연 후 발사했지만 달에 착륙하는 중 실패하였다.

달 궤도선인 찬드라얀 1호(Chandrayaan 1)의 임무조기종료 원인은 태양방사선으로 인한 컴퓨터 전원장치의 문제였다. 정지궤도에서 우주방사선의 영향은 비교적 많이 알려져 있지만, 정지궤도를 넘어 달에서 우주방사선의 영향은 많이 공개되어 있지 않다. 찬드라얀 1호 설계 시에도 달에서 우주방사선의 영향이 충분히 고려되지 못하였고, 예상보다 높은 수준의 우주방사선에 노출되고 전원장치의 실패로 연결되어

결국 임무가 조기에 종료되었다. 달 탐사를 위한 우주선 설계 시 달에서 우주방사선 영향에 대해 깊은 이해가 필요할 것으로 판단된다.

달 착륙 임무를 위한 찬드라얀 2호(Chandrayaan 2)는 협력국인 러시아의 달 착륙선 개발 중단으로 발사가 8년간 지연되었다. 러시아는 화성 표본채취 임무(Phobos-Grunt)에 사용할 착륙선을 개발한 후 이 기술을 찬드라얀 2호 임무의 착륙선 개발에 활용할 예정이었다. 그러나 '11년 착륙선의 개발 실패와 재정적인 문제로 착륙선을 제공할 수 없다고 선언하였다. 이후 인도는 찬드라얀 2호의 착륙선을 독자로 개발하였고, 이 착륙선이 달에 착륙하는 동안 문제가 발생하여 결국 달 착륙 임무는 실패했다. 우주분야에서는 막대한 비용과 높은 기술 난이도 때문에 국제협력을 진행하기도 하는데, 이때 협력 국가의 중도포기로 인한 일정 지연을 최소화할 수 있는 대비가 필요할 것으로 판단된다.

찬드라얀 2호 임무의 달 착륙선 비크람(Vikram)은 달 상공 5km에서 146m/s의 속력으로 달에 착륙하는 동안 유도 소프트웨어의 고장으로 예상보다 750m 떨어진 곳에 착륙했다. 착륙 시 충격으로 내부 장치가 손상되고 통신이 두절되었다. 우리나라도 달 착륙선을 개발한 이력이 없어, 달 착륙 관련 유도 소프트웨어 기술 및 경험이 없는 상황이다. 향후 달 착륙선 개발 시 국제협력 등을 통해 유도 소프트웨어 기술 및 신뢰성 확보가 필요하다.

임무 조기종료(우주선) : 태양방사선의 영향으로 달 궤도선 찬드라얀 1호의 P-side 컴퓨터의 전원장치에 문제가 발생하여 R-Side 컴퓨터를 사용하였으나, 몇 달 후 R-Side 컴퓨터의 전원장치도 문제가 발생하여 임무수명 2년의 절반인 312일 동안 임무 수행[4].

지연 및 실패 : 인도는 달 궤도선과 월면차를, 러시아는 달 착륙선을 개발하여 2011년까지 찬드라얀 2호를 발사할 계획. 개발 중 러시아는 기술적 문제로 2015년까지 착륙선을 제공할 수 없다고 선언. 인도는 착륙선을 독자 개발하여 8년 지연된 2019년 7월에 발사하였으나 달 착륙선이 달 착륙에 착륙하는 동안 유도 소프트웨어에 고장이 발생하여 불안정한 착륙 후 교신이 두절되고 임무에 실패[5,6,7].

2.3.3 일본

1990년 이후 현재까지 수행한 3회의 달 탐사 중 1개 임무가 4년 지연되었고, 1개 임무가 중단되었다.

루나-A(LUNAR-A)는 달 지진과 내부 열을 측정하는 임무로 궤도선과 Penetrator라는 2개의 탑재체로 구성된다. 탑재체는 달의 지하로 2m를 파고 들어가서 달의 지진과 내부 열을 측정하고 궤도선에 정보를 전달하고, 궤도선은 다시 지구로 정보를 전달할 계획이었다. 그러나 인증시험 실패, 통신계 보강 등 기술적인 문제로 탑재체 개발이 지연되고, 달 궤도선

의 노화와 재정적인 문제로 12년 지연된 사업은 중단되었다. 기술진보를 위한 도전적인 임무도 중요하지만 사업시작 전에 구현 가능성에 대한 충분한 기술적 검토가 필요한 것으로 보인다.

지연 : 달 궤도선 가구야(Kaguya)는 2003년에 발사할 계획이었으나 발사체(H-II) 개발 문제로 4년 지연되어 2007년에 발사[2].

중단 : 달 궤도선 루나-A는 1995년 발사계획이었으나 탑재체 개발 등 기술적 문제로 12년 지연되어 2007년에 결국 계획이 중단[8].

2.3.4 중국

중국은 2007년부터 현재까지 달 탐사 임무를 5회 수행하였고 창어 4호(Chang'e-4)의 micro-satellite를 제외한 모든 임무를 성공하였다. 그러나 지연은 2회 발생하였다. 지연의 원인은 임무설계 변경과 발사체 개발 실패였다.

지연 1 : 달 착륙선 창어 4호는 2015년 발사 예정이었으나 임무설계 변경으로 3년 지연되어 2018년 발사[9].

지연 2 : 달 표본채취를 위한 창어 5호(Chang'e-5)는 2017년 발사체(창정 5호) 개발 실패로 3년 지연되어 2020년 말에 발사 예정[10,11].

Table 12. Advanced country in Space technology Unmanned lunar exploration result since 1990s

	Mission	Spacecraft	Launch Vehicle	Launch Date	Result
I s r a e l	Beresheet (Lunar Landing)	Beresheet	Falcon9 (Space X)	'19.02.22	Failure (Spacecraft)
	Chandrayaan-1 (Lunar Orbit)	Chandrayaan-1	PSLV-C11 (ISRO)	'08.10.22	Early Termination (Spacecraft)
I n d i a	Chandrayaan-2 (Lunar Landing)	Orbiter	GLSV Mk III (ISRO)	'19.07.22	8 year Delay, Failure (Spacecraft)
		Vikram (Lander)			
		Pragyan (Rover)			
J a p a n	MUSES-A (Hiten) (Lunar Flyby, Lunar Orbit)	Hiten	M-3SII-5	'90.01.24	Success
		Hagoromo (Small satellite)			
	SELENE (Kaguya) (Lunar Orbit)	Kaguya (Main Orbiter)	H-IIA	'07.9.14	4 year Delay, Success
		OKINA (Small satellite)			
OUNA (Small satellite)					

	LUNAR-A (Lunar Orbit)	-	-	-	12 year Delay, Cancel	
C h i n a	Chang'e 1 (Lunar Orbit)	Chang'e yihao	Chang Zheng 3A	'07.10.24	Success	
	Chang'e 2 (Lunar Orbit)	Chang'e erhao	Chang Zheng 3C	'10.10.01	Success	
	Chang'e 3 (Lunar Landing)	Chang'e sanhao	Chang Zheng 3B	'13.12.01	Success	
		Yutu (Rover)			Success	
	Chang'e 5-T1 (Lunar Orbit)	Xiaofei (Return capsule)	Chang Zheng 3C/G2	'14.10.23	Success	
		Service module			Success	
	Chang'e 4 (Lunar Landing)	Queqiao (Relay satellite)	Chang Zheng 3B	'18.05.20	3 year Delay	Success
		longjiang-1 (Microsatellite)				Failure
		Longjiang-2 (Microsatellite)				Success
		Lander				Success
Yutu-2 (Rover)		Success				
Chang'e 5 (Lunar Sample Return)	-	Chang Zheng 5	End of '20 (Scheduled)	3 year Delay		
E u r o p e	SMART-1 (Lunar Orbit)	SMART-1	Ariane 5G	'03.09.27	Success	

III. 결 론

무인 달 탐사를 수행한 각 국가별로 실패사례를 분석하였다. 미국은 1958년부터 2013년까지 39회 중 24회의 임무를 성공하여 성공률은 62% 수준이며, 구소련은 1958년부터 1976년까지 57회 중 19회의 임무를 성공하여 성공률은 33% 수준이다. 미국과 구소련은 달 탐사 초기 발사체에서 많은 실패를 겪어 성공률이 낮았다. 이후 발사체 기술이 안정되어 1990년부터 현재까지 중국, 일본 등 우주선진국에서 발사체 실패로 인한 임무실패는 더 이상 발생하지 않았다. 1990년 이후 달 탐사 실패는 이스라엘 1회, 인도 1회로 총 2회 발생하였는데, 두 사례 모두 달 착륙선 임무에서 발생하였다. 또한 인도의 찬드라얀 1호는 발사에 성공하였지만 우주방사선 문제로 설계수명의 절반기간만 임무를 수행하였다.

향후 우리나라의 달 탐사 사업에 참조하기 위해 세계 각국의 무인 달 탐사 실패 원인 중 우주선 실패 원인만 Fig. 7에 정리하였다. Avionics가 9건으로 가장

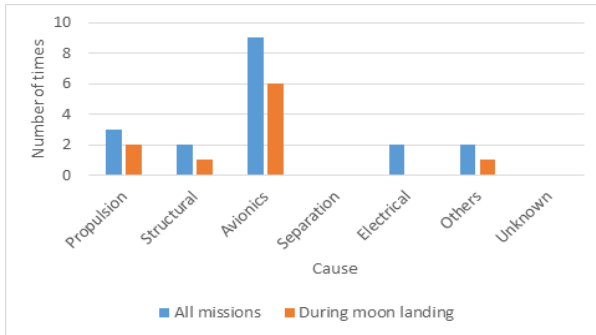


Fig. 7. Unmanned lunar exploration spacecraft failure cause classification

많았고, Avionics 중에서 자세제어계 실패가 5건, 측정계 실패가 2건, 컴퓨터 실패가 1건, 유도 소프트웨어 실패 1건으로 자세제어계의 실패가 가장 많았다. 향후 국내 달 탐사 사업 수행 시 우주선의 Avionics, 특히 자세제어계 설계 시 면밀한 검토가 필요하다.

한편, 세계 각국의 무인 달 탐사 임무에서 발생한 우주선의 실패 중, 달에 착륙하는 동안 발생한 실패가 55%나 차지한다. 또한, 90년대 이후 우주선진국의 무인 달 탐사 실패는 모두 달 착륙선의 달 착륙 중에 발생하여 달 착륙선을 달에 착륙시키는 임무의 난이도가 상당히 높음을 알 수 있다. 달 착륙선과 달표본 채취 임무에서 달 착륙 중 우주선에서 발생한 실패의 원인은 Avionics 6건, Propulsion 2건, Structural 1건, Others(인적오류) 1건으로 Avionics 실패가 가장 많았다. Avionics 중 자세제어계 3건, 측정계 2건, 유도 소프트웨어 1건으로 향후 달 착륙선 임무수행 시 자세제어계와 측정계에 신중한 설계가 필요하다. 특히 측정계 및 유도 소프트웨어 실패로 인한 무인 달 탐사 임무 실패는 달 착륙 중에만 유일하게 발생하여 달 착륙선 개발 시 더욱 신중한 설계가 필요하다.

이밖에도 고장진단 및 복구 설계에서 임무수행 중 일어날 수 있는 시나리오를 가능한 모두 검토하여 의도치 않게 발생할 수 있는 고장확산을 사전 예방해야 하며, 달에서 우주방사선이 우주선 부품에 미치는 영향을 충분히 고려하여 설계에 반영해야 하며, 국제 협력 시에는 협력국의 개발 실패에 대한 대비책이 필요하다.

본 논문에서는 90년대 이후 공개된 사업지연, 중단, 임무조기 종료 사례를 조사하였다. 사업지연은 중국 창어 4호에서 3년, 창어 5호에서 3년, 일본 가쿠야에서 4년, 루나-A에서 12년, 인도 찬드라얀 2호에서 8년 발생하였다. 일본의 12년 지연된 루나-A 임무는 결국 발사 이전에 중단되었다. 사업지연 기간은 3~12년이었고, 원인은 개발지연 3건(발사체 2건, 탑재체 1건), 사업초기에 예상할 수 없는 요인 2건(임무변경 1건, 국제협력 1건)으로 각국의 사업지연 기간과 원인이 다양하였다.

수많은 해외 무인 달 탐사 실패사례에서 보듯 달 탐사를 포함한 우주개발은 우주선 또는 발사체를 구성하는 부분품 하나의 실패가 임무실패로 이어지며, 임무실패 후에는 사후조치가 불가능한 특징이 있다. 따라서 향후 달 탐사 임무 성공을 위해 자세제어계 등의 부분품의 신뢰성 및 고장진단 및 복구, 내 방사선 설계 등 시스템의 신뢰성 확보가 매우 중요하며 다른 나라도 발사 지연을 감수하며 임무 성공을 위한 신뢰성을 확보하고자 노력 중이다.

후 기

이 논문은 과학기술정보통신부 지원을 받아 게재되었으며, 과학기술정보통신부의 지원에 감사드립니다.

References

- 1) Sim, H. S., Ko, J. H., Choi, K. S., and Rho, W. R., "Case Study on Space Launch Vehicle Failures," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 33, No. 6, June, 2005, pp. 108~115.
- 2) Siddiqi, A. A., *Beyond Earth : a chronicle of deep space exploration, 1958 - 2016, 2nd Ed.*, Washington, DC : NASA History Division, 2018.
- 3) Foust, J., *Joining the lunar lander club Monday*, *The space review*, November 25, 2019.
- 4) Subramanian, T. S., *Chandrayaan-I: Mission lost*, *Frontline*, Vol. 26, Issue 19, September 12-25, 2009.
- 5) *India and Russia Sign an Agreement on Chandrayaan-2*, ISRO, November 14, 2007.
- 6) Guptan, M., *How did Chandrayaan 2 fail? ISRO finally has the answer*, *The week*, November 16, 2019.
- 7) Ramachandran, R., *Chandrayaan-2: India to go it alone*, *The Hindu*, July 13, 2016.
- 8) NormileJan, D., *LUNAR-A Gets an F*, *AAAS Science*, January 16, 2007.
- 9) Shay, S., *China Launches Satellite with Saudi Payload*, *Israel Defense*, May 22, 2018.
- 10) Goh, D., *China's Chang'e 5 lunar mission delayed to 2019, Chang'e 4 on schedule*, *SpaceTech Asia*, April 26, 2018.
- 11) Jones, A., *China targets late 2020 for lunar sample return mission*, *SpaceNews.com*, November 1, 2019.