

## 미국/유럽의 우주발사체 개발 중 실패사례 분석

김지훈\* · 이한주\* · 정동호\* · 조상연\*

### An Investigation on the Failure Examples of Space Launcher development in U.S.A./Europe

Jihoon Kim\* · Hanju Lee\* · Dongho Jung\* · Sangyeon Cho\*

#### ABSTRACT

The advanced countries like the United States of America and Europe have experienced many failures in development of space launch systems. Research and analysis of the failures will be helpful to our launch system development.

In this report, the failures of Space Shuttle in U.S.A. and Ariane in Europe were investigated and analyzed. These are excessively small portion of the failures, so it is necessary to investigate and research the more various failures of the other countries specially Russia(former Soviet Union).

#### 초 록

이미 발사체 개발의 선진국이 된 미국과 유럽 등도 발사체 개발 중 여러 실패 경험을 해 왔다. 아직 초보적인 수준인 우리의 경우 선진국의 실패사례를 조사하여 숙지한다면 우리의 발사체 개발 연구에 많은 도움이 될 것이다.

본 논문에서는 미국의 스페이스셔틀, 유럽의 아리안 발사체를 중심으로 실패사례를 조사하고 분석해 보았다. 이는 극히 일부분이며 앞으로 러시아와 기타 국가에 대해서도 더 다양한 실패사례를 조사할 필요가 있다고 사료된다.

Key Words: launch system(발사체), failure(실패), Space Shuttle Main Engine, Ariane, NASA, ESA

#### 1. 서 론

우주와 관련된 임무의 실패는 기술 진보를 추구하는 국가에게는 커다란 손실이 아닐 수 없다. 특히 커다란 발사체와 복잡한 위성이 결합된 임무의 경우 계획, 설계, 프로그래밍, 하드웨어 제

작에 막대한 기간이 요구된다. 따라서 성공적인 우주 발사 운용은 어떤 우주 임무에서든지 첫 번째 단계가 되는 것이다. 발사 실패는 우선적으로 여러 가지 임무 목적들을 상실하게 하고 하드웨어 손실로 인한 막대한 비용의 손실을 초래하고 실패 조사에 엄청난 시간과 노력이 요구되며 국가 위상에도 돌이킬 수 없는 상처를 주게 된다. 대부분의 우주 산업에 종사하는 기관이나 회사들은 자신들이 개발한 시스템에 대한 실패

\* 한국항공우주연구원 추진기관체계그룹  
연락처, E-mail: jhk0622@kari.re.kr

를 거론하기 꺼려한다. 그러나 과거에 겪었던 실패 경험들에 대한 조사를 통해 얻은 지식들은 현재와 미래에 개발되는 시스템에 발생할 수도 있는 실패를 피하게 위해 요긴하게 쓰일 수 있다.

따라서 본 연구에서는 우주 발사체 개발 선진국 중 미국과 유럽의 개발 과정 중 발생한 실패 현상과 그 원인에 대한 조사를 위해 노력했으며 본 논문은 다양한 실패 사례들 중 극히 일부만 요약하여 기술한 것이다.

## 2. 미국과 유럽의 우주 발사 통계

미국은 인류가 지금까지 만들어 온 발사체 중 가장 크고 강력하게 작동하는 로켓인 Saturn V 로켓으로 최초로 사람이 달 표면을 밟을 수 있도록 보낸 나라이다. 또한 미국은 NASA의 주도하에 세계 최초로 Space Shuttle Orbiter 를 발사하기 위한 재사용 가능한 STS(Space Transportation System) 를 개발하였다. Space Shuttle Orbiter 는 로켓처럼 발사되고, 우주선처럼 비행하며, 항공기처럼 착륙할 수 있는 것이다.

유럽은 현재 운용 중에 있는 기관이 ESA (European Space Agency) 인데 이것은 기존의 ELDO(European Launcher Development Organization) 과 ESRO(European Space Research Organization) 2개의 기관을 통합하여

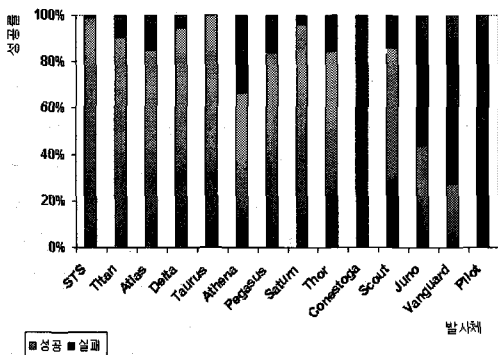


Fig. 1 미국 우주발사체 성공/실패율(1957-1998)

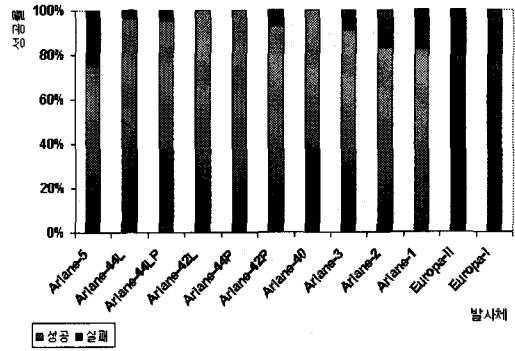


Fig. 2 유럽 우주발사체 성공/실패율(1968-1999)

1972년에 승인 후 1975년 5월 31일 정식으로 설립되어 현재까지 유럽의 우주 개발 프로젝트를 총괄하고 있다.

Fig. 1과 Fig. 2는 미국과 유럽의 총 발사에 대한 성공 및 실패 회수에 대한 것과 평균 성공 확률을 나타낸 것이다. 미국의 경우 1957년부터 1998년까지 성공 확률 87.5%(1125/1285), 유럽의 경우 1966년부터 1998년까지 89.9%(107/119)로 유럽이 미국에 비해 발사 시험 회수는 적지만 성공확률은 높게 나타났다.

## 3. 전반적인 우주발사체 실패 요인

발사체의 실패는 추진, 단분리, 항공전자, 전자/전기, 구조, 발사대, 지상 동력계, 지상 비행 관제, 조명 등의 서브시스템들과 관련된 문제에서 기인될 수 있다.

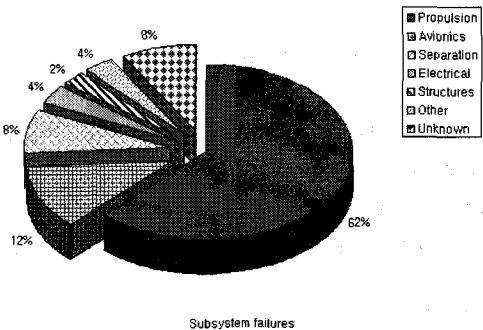


Fig. 3 서브시스템 별 실패율

1983년부터 1998년까지의 세계적으로 발사체 실패들이 어느 서브시스템에서 발생했는지에 대해 조사되었다. Fig. 3 은 발사체 서브시스템 별 실패에 관한 경향을 보여준다.

Fig. 3 에서 보면 대부분의 실패 요인이 추진 기관 서브시스템에서 나타난다. 미국에서는 총 22번의 실패 중 11번이 추진기관 시스템에서 발생했다고 한다.

#### 4. 미국과 유럽의 개발 중 실패사례

본 절에서는 미국의 Space Shuttle 추진 시스템인 SSME(Space Shuttle Main Engine) 개발 중 실패한 사례들을 살펴보고, 유럽의 Ariane 발사체의 비행시험 중에 실패한 사례들을 통해 교훈을 얻고자 한다.

##### 4.1 미국 SSME 개발 실패사례

SSME 는 처음으로 재사용을 위해 개발된 터보펌프식 액체 로켓 엔진이며 액체산소와 액체수소를 추진제로 사용하여 작동한다.

SSME 의 실패 분류는 다음의 6가지로 나눌 수 있다.; 연료 펌프, 산화제 펌프, 프리버너와 메인버너, 밸브, 덕트/매니폴드/열교환기, 제어. 또한 이는 다음으로 상세 분류할 수 있다.; 고압 산화제 펌프, 고압 연료 펌프, 연료 프리버너, 메인 인젝터, 메인 연료 밸브, 메인 산화제 밸브, 산화제 프리버너 산화제 밸브, 주 연소실 냉각제 방출 덕트, 고압 산화제 펌프 방출 덕트, 열교환기, 노즐 냉각제 공급라인, 제어 시스템.

Table 1 은 부품 별로 실패 경우를 분류한 것이다. 고압 연료 펌프에서 발생한 실패가 총 6회로 가장 많았다.

##### 4.1.1 연료 터보펌프 실패사례

연료 터보펌프 실패는 총 6회의 실패가 있었는데, 이 중 3가지는 터빈 블레이드 파괴로 인한 것이었고, 2가지는 터빈 방출 판 금속 파괴, 나머지 1가지는 로터 지지 부품과 냉각유로로 뜨거운 가스 침입으로 인하여 발생한 것이었다.

Table 1. SSME 부품별 실패 회수

HPFTP	6				
HPOTP	3				
Preburner/ Mainburner	FPB	Mainburner			
	3	5			
Valves	OPOV	MFV	MOV		
	1	1	1		
Ducts manifolds/ Heat exchangers	Nozzle	MCC	HEX	OX DUCT	
	2	1	1	1	
Control failures	2				

##### 4.1.2 산화제 터보펌프 실패사례

3가지 실패의 경우 모두 액체산소에 열이 가해지는 현상이 나타났으며 내외부 화염 발생으로 인해 하드웨어에 심각한 손상을 야기하였다.

2가지는 터보펌프 설계 자체의 문제였던 반면 3번째 실패는 시험 속도 센서의 문제로 나타났다.

##### 4.1.3 프리버너와 메인버너 실패

3가지 프리버너 실패가 모두 연료 프리버너에서 발생하였다. 첫 2가지의 경우 정상 파워 작동 중 발생했으며, 3번째의 경우 초기 시점에 발생했다.

메인버너/메인 인젝터의 5가지 경우는 모두 인젝터의 액체산소 포트 설계 문제로 야기되었다. 1가지 경우를 제외하고 모두 정상 파워 작동 중에 발생했다.

##### 4.1.4 밸브 실패

- ① 메인 산화제 밸브 실패 : 유동 소음이 진동을 일으켜 유입 슬리브 스크류에 침식을 야기.
- ② 메인 연료 밸브 실패 : 하우징 크랙으로부터 발생.
- ③ 산화제 프리버너 산화제 밸브 실패 : 고온의 가스로 침식된 씰 문제.

#### 4.1.5 덕트, 매니폴드, 열교환기 실패

2가지의 경우 노즐 조립체에 속한 연료가 공급되는 덕트가 파손되어 발생하였다. 1가지는 메인 연소실에서 나오는 냉각제 매니폴드가 파손되었다. 다른 1가지는 열교환기의 코일 파손으로 발생하였고, 마지막 경우는 고압의 산화제 펌프 방출 덕트 벽이 파손되어 발생하였다.

#### 4.1.6 제어 실패

2가지의 제어 실패가 발생하였다. 첫 번째의 경우 메인 산화제 밸브가 잘못 인식된 문제이며, 두 번째의 경우 기밀 링의 움직임으로 잘못된 압력 측정 신호를 일으켜서 발생된 실패였다.

### 4.2 유럽의 발사체 개발 실패사례

유럽의 발사체에는 Europa 시리즈와 Ariane 시리즈가 있다. Europa-I, II의 경우 총 11회 발사시험은 모두 실패로 끝났다.

Ariane 발사체는 Ariane-1부터 Ariane-5 까지 개발되었다. Ariane 시리즈는 1968년부터 1999년까지 129회의 발사 시험 중 117회의 성공으로 90.7%의 성공률을 나타내고 있으며, 다음은 Ariane 시리즈의 실패 결과들을 요약한 것이다.

#### 4.2.1 Ariane-3(V15)

- 실패날짜 : 1985-09-12
  - 페이로드 : BCS-3/Spacenet-3
  - 실패 시스템 : 추진
  - 실패시간 : 276초
  - 실패현상 : 3단 점화 실패, 기체가 계획된 비행궤적으로부터 벗어남
  - 사고과정
- 1, 2단은 정상 작동.

3단 점화를 위한 시퀀싱 유닛과 전기적 신호는 정확히 작동. 그런데 연소실에 예정보다 0.4초 늦게 점화됨. 뒤이어 엔진의 정상 작동 조건에 미치지 못함. 엔진은 비행 276초에 정지

#### ○ 실패요인

Failure Inquiry Board는 액체수소가 인젝터 밸브에서 누출되고 엔진 연소실을 예냉시키면서 3단이 정상적으로 점화되지 못하게 했다고 결론.

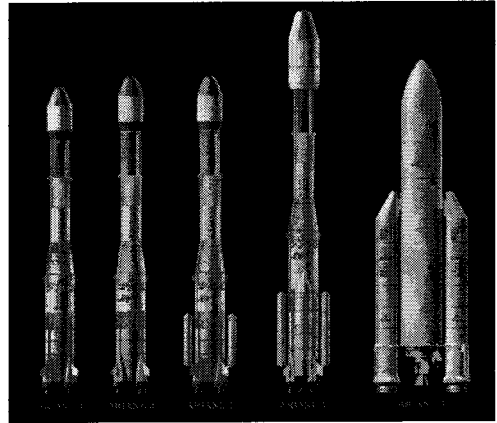


Fig. 4 Ariane Series

수소탱크 출구 밸브는 1단 작동 중 3단 수소 공급 시스템을 예냉시키기 위해 열려있었음(탱크와 인젝터 밸브 사이를 냉각). 인젝터 밸브가 새면서 액체수소가 엔진 연소실을 예냉시키게 된 것. 이것은 결국 정상 연소압보다 낮은 압력을 야기하고 추진제 혼합비가 감소했으며 결국 3단 점화를 지연시키게 됨.

#### 4.2.2 Ariane-2(V18)

- 실패날짜 : 1986-05-30
- 페이로드 : Intelsat VA
- 실패시스템 : 추진
- 실패시간 : 280초
- 실패현상 : 3단 점화 실패, 기체가 탄도궤적에서 지구를 향해 아치형으로 되돌아옴. 기체와 페이로드는 Range Safety에 의해 파괴됨
- 사고과정

#### 1, 2단 정상 비행

3단이 점화에 실패하면서 LH2 펌프의 cavitation으로 인한 LH2 공급이 단절되고 터보 펌프 시동으로부터 가스제너레이터가 임무수행을 하지 못함.

#### ○ 실패요인

3단의 실패가 점화 시퀀스의 완벽하지 않은 조합으로 인한 것일 수 있다고 보여줌. 이는 전체적인 엔진 시동과정을 교란시키는 폭발적인

점화로 인한 부분적으로 유지되지 못한 점화상태의 결과.

폭발적인 점화로부터의 고압의 파장은 추진제 공급 시스템으로 전파되고 수소 공급라인에 충격을 주었으며 수소 터보펌프에 cavitation을 일으키고 가스 제너레이터로 공급되어야 할 수소 압력을 전달하지 못하게 하였으며 결국 3단 엔진의 shutdown의 결과를 가져옴.

#### 4.2.3 Ariane-44L(V36)

- 실패날짜 : 1990-02-22
- 페이로드 : Superbird-B/BS-2X
- 실패 시스템 : 추진
- 실패시간 : 101초
- 실패현상 : 1단이 추진되어 비행하는 도중 폭발. 일본 위성 2기를 싣고 기체 폭발
- 사고과정  
엔진점화 후 3.4초, 발사체 이륙.

6.2초, 4개의 Viking-5 엔진 중 1개 엔진의 연소실 압력이 0.5초 사이에 58bar에서 30bar로 하락. 추력 평형을 맞추기 위해 기체 자세제어 시스템이 4개의 Viking-5 엔진 중 2개는 김발을 작동시킴. 90초에 갑자기 김발 리미트(4.5도)에 도달. 이는 기체가 angle of attack에 도달케 함. 공기역학적 힘으로 인해 분해된 기체는 101초에 폭발.

#### ○ 실패요인

통신 데이터의 평가는 기체의 추력 손실이 4개 엔진 중 하나의 연소실 압력 하락과 관련이 있다고 보여줌. 구조물을 분해하여 검사해 보니 15\*30cm의 천조각 하나가 엔진이 제 기능을 하지 못하도록 주 냉각수 밸브의 입구 부분에 막혀 있는 것이 발견됨.

냉각수 라인에 비표준 재작업을 한 후 불행하게도 냉각수 밸브로 연결된 냉각수 라인 내에 천조각이 남겨지게 된 것이었음.

#### 4.2.4 Ariane-44LP(V63)

- 실패날짜 : 1994-01-24
- 페이로드 : Eutelsat 2F5/Turksat 1
- 실패 시스템 : 추진

○ 실패시간 : 428.3초

○ 실패현상 : 3단이 기능장애를 일으킴

○ 사고과정

3단 점화 후 60초, 액체산소 터보펌프 내 베어링의 온도가 급속히 상승.

1단 점화 후 428.3초, 터보펌프 연소압, 출구압, 회전속도가 급속히 하락. 산화제 유동 차단, 고도 170km, 페이로드 분리 기점 30km를 남겨두고 3단 엔진이 정지되는 결과 초래

○ 실패요인

산화제 펌프에 담겨있는 베어링의 불완전한 예냉이 베어링에 과부하의 요인들과 조합되면서 3단 엔진의 shunt-down을 초래. 이 과부하 요인들은 지상 레벨에서의 산화제 퍼지 과정 동안의 습기 침투 또는 베어링 cavity 내에 잡힌 가스를 포함.

액체산소 터보펌프 베어링의 불완전한 예냉은 습기 침투, 필터링 장애, 온라인 열적 장애(비정상적인 열적 조건에서 발생하는 유동 장애) 혹은 퍼지 작업으로부터 남은 유체 잔여량에서 비롯될 수 있었음.

#### 4.2.5 Ariane-42P(V70)

○ 실패날짜 : 1994-12-01

○ 페이로드 : PAS-3

○ 실패 시스템 : 추진

○ 실패시간 : 900초

○ 실패현상 : 3단 기체가 최대 추력 도달에 실패. 따라서 궤도 분사 속도와 고도에 미치지 못함.

○ 사고과정

1, 2단 정상 비행.

3단 추력은 최대 추력의 70%밖에 내지 못하고 감소한 추력으로 고도 200km에서 중단될 때까지 예정된 780초 연소시간 중 740초 동안 연소. 기체와 페이로드는 궤도 속도에 도달하지 못하고 지구로 추락.

○ 실패요인

엔진의 터보펌프를 구동하는 가스 제너레이터의 정상 연소압보다 낮은 압력으로 인해 3단 엔진은 정상 추력의 70%밖에 내지 못함. 낮은 연

소압은 가스 제너레이터로 액체산소가 충분히 공급되지 못하였기 때문임. 산화제 부족은 액체 산소 배관이 어떤 외부 물질이나 얼음에 의해 부분적으로 장애를 받았기 때문임. 공정 단계에서 비행 작업까지의 기체 생산 과정에는 이례적인 요소는 없었음.

이 발사체의 3단 실패는 알 수 없는 사고로 인정됨.

#### 4.2.6 Ariane-5(V88)

- 실패날짜: 1996-06-04
- 페이로드: 4 Clusters
- 실패 시스템: avionics(항공전자장치)
- 실패시간: 40초
- 실패현상

발사체가 36.7초에 비행항로를 벗어나면서 산산조각 나고 점화 후 40초, 고도 4km, 사정거리 1km 지점에서 폭발.

- 사고과정
- 39초, 공력으로 기체가 분해되면서 40초, 폭발
- 실패요인

기체의 관성참조시스템(inertial reference system; IRS) 소프트웨어의 설계와 시험에서의 에러로 인한 실패. IRS 비행 소프트웨어는 Ariane-4 발사체 조건에 맞추어 프로그램 되었으며 Ariane-5 비행으로 모사된 조건에서는 한번도 시험된 적이 없었음. 그러나 Ariane-5는 추력이 더욱 강력하고 Ariane-4에 비해서 수평 속도가 훨씬 빠름. 큰 수평 속도 편차는 IRS 소프트웨어에 에러를 일으키고 결국 정확한 비행 가이드스 정보의 모든 손실을 초래함.

탐재된 컴퓨터는 IRS로부터 잘못된 정보를 입수하고 고체 부스터의 노즐과 메인 엔진의 노즐을 극한 포지션까지 회전하도록 명령을 내렸음.

## 5. 결 론

그동안 개발되어 온 전 세계의 발사체 실패 경향을 조사하고 미국과 유럽의 발사체 개발을 중심으로 실패사례를 살펴보았다. 발사체 개발의 선진국들의 시험 회수는 매우 많고 또한 실패의 경우도 다양했다. 선진국의 경우도 많은 실패를 통해 혹독한 예산의 손실과 좌절을 겪었을 것이다. 그러나, 어려움 속에서도 정부와 개발에 참여하는 많은 이들의 의지로 프로젝트가 지속될 수 있었으며 현재에 와서는 매우 신뢰도 높은 발사체 개발/생산/마케팅을 해 나가고 있다.

우리는 선진국의 실패 사례를 공부하고 이를 교훈으로 삼음으로써 우리의 발사체 개발 과정에 있어 겪을 수 있는 시행착오를 줄이고 성공적인 개발 기간을 단축할 수 있을 것으로 사료된다.

사실 전 세계적으로 가장 많은 시험을 해 온 국가는 러시아(구 소련)이다. 본 조사에서는 러시아는 대상으로 삼지 않았으나, 앞으로 더욱 유용한 교훈들을 얻기 위해서는 러시아의 다양한 실패 사례들도 조사하고 분석해 봐야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. I-Shin Chang, "Overview of World Space Launches," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 16, No. 5, September-October 2000.
2. Harry A. Cikanek, "Characteristics of Space Shuttle Main Engine Failures," AIAA.
3. I-Shin Chang, Susumu Toda and Seishiro Kibe, "European Space Launch Failures," 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit 17-19 July 2000.
4. 김지훈, 이한주, 정동호, 조상연, "미국/유럽 발사체 개발 중 실패사례," KARI-PSG-TM-2004-017.