



SpaceX의 발사체 개발 전략 분석

이금오^{a,*}

An Analysis of Launch Vehicle Development Strategy of SpaceX

Keum-Oh Lee^{a,*}^aCombustion Chamber Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea

* Corresponding author. E-mail: kol@kari.re.kr

ABSTRACT

SpaceX is currently leading the global launch market with the successful launch and recovery of Falcon 9 v1.2 Block 5. SpaceX developed Merlin engine, a kerosene gas generator engine, and continuously upgraded the engine from Falcon 1 to Falcon Heavy to increase payload weight. SpaceX suffered a lot of failures early on, but with the help of NASA, it was possible to overcome many crises and develop vehicles. In addition, it successfully developed reusable vehicles, which drastically reduced operating costs. Subsequent launch vehicles in Korea also need to be developed with reference to SpaceX's development strategy.

초 록

SpaceX는 현재 Falcon 9 v1.2 Block 5의 성공적인 발사 및 회수로 세계 발사 시장을 주도하고 있다. SpaceX는 케로신 가스 발생기 엔진인 Merlin 엔진을 개발하였고, Falcon 1에서 Falcon Heavy까지 엔진을 지속적으로 업그레이드하여 탑재 중량을 증가시켰다. SpaceX는 초기에 많은 실패를 겪었지만 NASA의 도움으로 많은 위기를 극복하고 발사체를 개발할 수 있었다. 또한 재사용 발사체를 성공적으로 개발하여 운용비용을 크게 절감했다. 한국의 후속 발사체도 이러한 SpaceX의 개발 전략을 참고하여 개발할 필요가 있다.

Key Words: Merlin Engine(머린 엔진), Reusable Launch Vehicle(재사용 발사체), Kerosene Engine(케로신 엔진), Elon Musk(일론 머스크)

1. 서 론

현재 우주 개발의 혁신을 주도하고 뉴스페이스(New Space) 시대를 선도하는 벤처 기업인

SpaceX는 그들의 Falcon 9를 통해 6,200만 달러로, Falcon Heavy를 통해 9,000만 달러로 발사 서비스를 하고 있다[1]. Falcon 9는 현재 1단 부스터의 안정적인 착륙과 재사용을 통하여 많은 고객을 유치하고 있다. 현재 운용 중인 Falcon 9 v1.2 Block 5 모델의 1단 부스터는 2019년 5월 기준으로 최대 3회 재사용되었다[2].

Falcon 9는 1단에 9개의 Merlin 1D 엔진을 탑재하고 있으며, 2단에 하나의 Merlin 1DV 엔진

Received 10 June 2019 / Revised 7 October 2019 / Accepted 12 October 2019
Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2019년도 춘계학술대회(2019. 5. 29-31, 라마다프라자 제주호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

을 탑재하여 거의 비슷한 10 개의 엔진을 발사체에 사용함으로써 대량 생산에 의한 경제성을 확보하였다. 또한 동일한 규격의 부스터 코어를 탑재한 Falcon Heavy를 개발하여, 1단의 3개의 부스터를 재사용함으로써 초대형 발사체의 발사 비용을 절감 할 수 있다는 것을 보여주었다[1].

한국형발사체와 같은 케로신 가스 발생기(kerosene gas-generator) 엔진을 주력으로 사용하는 SpaceX의 움직임은 한국형발사체 이후의 발사체 개발에 중요한 시사점을 준다. 본 연구에서는 SpaceX의 발사체 개발 전략에 대해서 분석하였으며, 한국형발사체 개발 이후 새로운 발사체 개발 방향에 대해서 간략히 제시하였다.

2. Falcon 1

SpaceX의 창업자 Elon Musk는 2002년 6월 El Segundo의 한 창고에서 SpaceX를 설립하였고, 그들의 최초 로켓인 Falcon 1을 개발하기 위해 사재 100만 달러 이상을 투입하였다. 600 kg급 탑재체를 쏘아 올릴 수 있었던 높이 21.3 m, 직경 1.7 m의 2단형 발사체인 Falcon 1은 가능한 최저 가격을 달성하기 위해 FASTRAC 엔진을 기반으로 한 Merlin 1A 엔진을 사용하였다. 이 엔진을 구동하기 위한 파워팩에는 Barber Nichols가 개발한 터보펌프를 사용하였다. Falcon 1의 상단에는 Kestrel 엔진을 사용하였으며, 높은 확

대비(area ratio)를 만들기 위해 복사냉각형 노즐인 니오븀(Niobium)기반의 확대 노즐부가 사용되었고, 노즐목(nozzle throat)에는 식마냉각형(ablative cooled) 소재가 사용되었다. 탱크는 모노코크(monocoque) 알루미늄을 사용한 공통 격벽(common bulkhead)을 사용하여 중량 및 비용을 절감하였고, 탱크 가압을 위하여 헬륨을 사용하였다. 2단의 물 제어를 위하여 헬륨 냉가스 추력기를 사용하였으며, 1단과 2단 사이의 연결부(interstage)에는 탄소 복합 재료를 사용하였다[3].

2003년 3월, 38톤급 진공 추력을 가진 Merlin 1A 부스터 엔진과 3.17톤의 Kestrel 상단 엔진이 처음으로 텍사스의 McGregor 시험장에서 시험되었다. 2004년 개발과 시험이 진행 되면서, Merlin 1A 엔진에 여러 문제점이 발생하였다. 초기의 연소기 헤드부 매니폴드에 사용된 재료는 알루미늄이었으며 주조를 사용하여 제작하였다. 그러나 지속적으로 균열이 발생하여 미국의 기존 엔진들에서 사용하였던 인코넬(Inconel) 계열의 매니폴드로 교체하였다. 초기에 개발되었던 Merlin 1A의 특성속도(Isp)가 낮았기 때문에 계속 개량을 거듭하면서 목표 성능을 만족하도록 노력하였다.

2005년 1월, SpaceX는 38톤급의 Merlin 1A 엔진 인증 시험을 완료하였고, 3월에 1단 탱크 구조 시험을 완료하였다. 4월에 엔진을 1단에 최종적으로 조립한 이후, 5월에 반덴버그 공군 기지(Vandenberg AFB)에서 Falcon 1의 1단 점화 시험을 5 초간 실시하였다(Fig. 1). SpaceX는 반덴버그 공군 기지에서 발사하기 원했으나 발사장 인근에서 발사 시점을 기다리고 있던 Titan 4의 발사 연기로 Falcon 1의 발사가 계속 연기가 되는 상황이 지속되었다. 이에 SpaceX는 하와이의 Omelek 섬에 있는 Kwajalein 환초에서 자체적으로 발사장을 꾸미고 발사를 시도하였다.

2006년 3월, Falcon 1은 마이크로 위성인 Falconsat 2를 탑재하고 발사되었으나 발사 25초 만에 화재가 발생하였고, 34초 후 엔진이 종료되고 위성이 섬에 위치한 건물의 지붕으로 추락하는 사고가 발생하였다. 사고 조사 이후 SpaceX는 Falcon 1에서 연료(kerosene) 누설이 발생하



Fig. 1 The installation of a Falcon 1 rocket in Vandenberg Air Force Base [3].

였는데, 이것의 원인으로는 직원의 연결부 너트 조임(fitting) 실수 또는 터보펌프 입구에 있는 알루미늄 너트의 응력 부식 균열 중 하나인 것으로 추정된다고 발표하였다.

2007년 3월, SpaceX는 Falcon 1의 2차 발사를 시도하였다. Merlin 1A를 탑재한 1단은 정상적으로 점화되었으며, 단 분리에도 성공하였지만, 단 분리 후 2단에서 이상 신호가 발생하였다. 곧 2단이 롤(roll) 제어가 되지 않아 2단의 무게중심을 기준으로 동체가 회전하여 팽이가 도는 것 같은 큰 형상으로 날아가게 되었고, 마지막에는 진동이 증가하면서 원격 측정 신호(telemetry)가 차단되었다. 며칠 후, Elon Musk는 2단 탱크 내에 있던 산화제에 슬로싱(sloshing)이 발생하여 진동을 일으켰으며, 그 진동이 TVC 시스템과 커플링(coupling)되면서 비행 제어가 불가능할 정도로 커졌다고 발표하였다[3].

2008년 8월에, SpaceX는 세 번째 Falcon 1을 출시하였고, 이 발사체에는 Merlin 1A 엔진 대신 SpaceX가 개발한 최초의 재생 냉각형 엔진인 40톤급의 Merlin 1Ci 엔진을 탑재하였다. 1단은 정상적으로 점화되었지만, 1단 분리 후 1단 엔진의 잔류 추력에 의해 1단이 2단에 충돌하면서 결국 실패하게 되었다. SpaceX는 3회 연속 발사 실패로 인해 파산 위기까지 몰렸지만, NASA의 재정 지원에 힘입어 9월에 4번째 Falcon 1을 발사에 성공시키고 극적으로 회생하게 되었다. 2009년 7월에 발사되었던 5번째 Falcon 1은 말레이시아의 위성 RazakSAT를 탑재하여 세계 최초의 상업발사에 성공하였다. Falcon 1의 발사가 종료되면서, Merlin 1Ci 엔진은 총 3번 비행하였다.

3. Falcon 9 v1.0

Merlin 1A 엔진 개발이 어려움에 직면했을 때인 2003년에 SpaceX는 5개의 Merlin 1A 엔진을 1단에 탑재한 Falcon 5의 개념을 처음으로 발표하였다. 이것은 아폴로 계획에서 사용되었던 Saturn V의 1단 개념과 비슷하다고 할 수 있다.

2003년 Falcon 5는 4.2톤의 탑재체(payload)를 LEO로 보낼 수 있도록 설계되었으며, 가격은 1200만 달러로 책정되었다. 다음해에는 Merlin 1B 엔진의 개발 계획이 발표되었고, 상단에 수소 엔진 RL10을 탑재한 업그레이드된 Falcon 5를 발표하였다. 이후 2005년에 정부의 요구에 따라 9톤의 탑재체를 LEO에 보낼 수 있도록 1단에 9개의 Merlin 1B 엔진을 탑재한 Falcon 9를 처음으로 발표하였다[3].

Falcon 1의 발사가 계속 지연되고 실패가 계속 되면서, Falcon 9의 Merlin 1B 엔진은 지상추력 43톤급 재생냉각 엔진인 Merlin 1C로 교체되었으며, 이 기간 동안 NASA는 COTS (Commercial Orbital Transportation Services)로 Falcon 9를 선정하였다. 이로 인해 2006년 SpaceX는 2억 7,800만 달러의 자금을 수혈을 받게 되었다.

2007년 두 번째 Falcon 1 발사에 실패했을 때, Falcon 9의 배틀십(battleship)형 1단이 처음으로 제작되었다. 텍사스의 맥그리거(McGregor) 시험장에서 2007년 11월부터 2008년 11월까지 1단 부스터의 9개 엔진이 하나씩 테스트 되었다. 2009년 초, 시험장에서 옴긴 Falcon 9의 1단을 발사대에 조립하여 발사대를 검증하는 시험을 거쳤다. 2009년 말부터 2010년 초까지 첫 번째 FM(Flight Model)형 Falcon 9가 조립장에서 조립되었으며, WRT(wet rehearsal test)를 거쳐 6월 최초 발사를 시도 하였다.

케이프 커내버럴(Cape Canaveral)에서 발사된 최초의 Falcon 9의 1단은 정상적으로 작동했지만 2단이 호주 상공을 지나는 동안 3축 롤 제어에 문제가 생기면서 결국 최초의 발사 시도는 실패로 끝났다. 당시 Falcon 9에 탑재되어 있던 드래곤 시뮬레이터(Dragon simulator)는 궤도에 안착할 수 있는 속도가 부족했기 때문에, 20일 후에 대기권에 재진입하였다[5].

Falcon 9의 두 번째 발사는 2010년 12월에 이루어졌으며(Fig. 2), 발사 직전에 상단 엔진인 Merlin 1CV 니오븀 복사냉각 노즐에서 두 개의 균열이 발견되었다. Merlin 1CV의 복사 냉각 노즐의 길이는 2.7 m 였는데, SpaceX는 미션에 문제가 없음을 확인하고, 복사 냉각 노즐을 1.2 m



Fig. 2 The second launch of Falcon 9 [4].

잘라내고 그대로 발사했다. Falcon 9의 2차 발사는 성공적으로 진행되었으며, 드래곤은 ISS에 진입하였다. 당시 드래곤은 추력기로 Super Draco를 사용하였는데, 18개의 Draco 추력기 중 하나가 점화하지 못했지만, 중복 설계 덕분에 미션은 최종적으로 성공하였다.

Merlin 1C 엔진으로 구동되는 Falcon 9는 그 이후로 2006년에 NASA와 체결하였던 COTS 미션으로 ISS에 한 번 발사하였고, 2008년 12월에 체결하였던 CRS (Commercial Resupply Service) 미션으로 ISS에 두 번 발사하였다. Falcon 9의 네 번째 미션에서는 처음으로 동시에 두 가지 미션이 수행되었다. 한 가지는 ISS로 화물을 보내는 CRS 미션과 $350 \times 750 \text{ km} \times 51.65 \text{ deg}$ 궤도에 165 kg Orbcomm 프로토타입 위성을 투입하는 미션이었다. 당시 이륙은 성공적으로 진행되었으나 발사 79 초 후에 1단의 Merlin 1C 엔진에서 오류가 발생하여 9개의 엔진 중 하나를 중단시켰다. 당시 Falcon 9는 고장 안전 설계(fail safe design)인 엔진 아웃(engine out) 설계가 되어 있었기 때문에 나머지 엔진들을 원래 계획보다 더 긴 시간 연소시키는 것을 통해 추력 손실을 보정하였다. 이를 통해 첫 번째 미션인 CRS 미션은 문제없이 진행되었으나, 두 번째 미션인 Orbcomm 위성을 궤도에 투입할 때는 추진제 양이 부족해져서, 위성이 궤도 진입에 실패하였다. Falcon 9의 다섯 번째 미션에서도 문제가 발생하였는데, 드래곤이 궤도에 도달한 후, 4개의 추력기 포트(truster pod) 중 3 개가 작동

하지 않는 것이었다. 결국 여러 가지 방법을 시도하여 결국 제어에 성공하기는 했지만 이로 인해 ISS와 드래곤의 랑데부(rendezvous)는 하루 지연되었다[4].

SpaceX는 Falcon 9의 초기 모델인 v1.0을 다섯 번 발사하여 ISS에 도킹하는 실험을 진행하였다. 다섯 번의 발사 중 아무 문제없이 성공적으로 발사된 것은 세 번째 발사 때였으며, 2번(1차, 4차)은 임무 실패로 기록되었고, 나머지 2번(2차, 5차)은 문제가 발생하기는 하였으나 성공으로 기록되었다.

4. Falcon 9 v1.1

SpaceX는 Merlin 1C를 사용한 초기 Falcon 9 모델 이후에 63톤급의 진공 추력을 가진 Merlin 1C+ 엔진을 개발하였으며, 이 엔진을 기반으로 하여 2008년 4월에 Falcon 9의 Block 2 버전을 발표하였다. 당시 시점이 Falcon 1이 두 번 밖에 발사되지 못한 것을 고려할 때, SpaceX의 다음 단계 엔진 개발과 발사체 개발은 매우 빠르게 진행되는 것이라고 할 수 있다. Block 2 버전은 LEO에 10.5톤의 탑재체를, GTO에 4.54톤의 탑재체를 보낼 수 있도록 계획되었지만 후속 Merlin 1D 엔진이 개발되면서 Block 2 버전은 최종적으로 발사되지 못하였다[4].

Merlin 1D를 사용한 Falcon 9 Block 3 모델은 나중에 Falcon 9 v1.1로 이름이 바뀌었으며, 이로 인해 Merlin 1C를 사용했던 초기 버전의 Falcon 9는 v1.0으로 이름이 변경되었다. 2011년 4월 Falcon 9 v1.1을 공식화 한 Elon Musk는 Merlin 1D가 이미 연소 시험을 하고 있으며 2012년 중반 Falcon 9 발사에 사용될 것이라고 발표했지만 실제로는 2013년 중반 6번째 발사에 사용되었다[5].

2012년 Merlin 1C+의 연소시험을 완료한 SpaceX는 재사용 발사체를 위해 Grasshopper를 제작하였다. Grasshopper는 Falcon 9의 1단 동체가 착륙할 때 자세 제어 및 속도 제어가 어느 정도 가능한지 평가하기 위한 목적으로 제작되



Fig. 3 The grasshopper ascends near McGregor[5].

었다. 9월 텍사스 맥그리거 시험장 근처에서 Grasshopper를 2.5 m 높이까지 상승시킨 SpaceX는 11월에는 5.4 m, 12월에는 40 m로 상승고도를 증가시켰다. 2013년 3월 80 m, 4월 250 m를 상승시킨 후, 6월에 1분 이상 비행하여 300 m까지 상승시켰다(Fig. 3). 8월에는 300 m 상승 후 수평으로 100 m를 이동하는 시험까지 수행하였다. 성공적인 비행과 착륙 후 Merlin 1C+를 이용한 Grasshopper 테스트는 완료되었다.

SpaceX는 Falcon 9 v1.0을 발사한 이후에 바로 Falcon 9 v1.1을 발사할 수 있도록 하기 위해서 기존에 임대하고 있던 케이프 커내버럴에 있던 발사대 외에 반덴버그 공군기지(Vandenberg AFB)에 있는 Space Launch Complex 4 East 발사대를 임대하였다. 케이프 커내버럴은 플로리다 주에 있는 동부해안의 발사대이며, 반덴버그 공군기지는 캘리포니아 주에 있는 서부해안의 발사대로서 두 발사대의 발사 환경은 매우 다르다. 2011년 7월부터 기존에 있던 반덴버그의 발사대를 해체하고 새로운 발사대를 건설하는 작업을 시작하였다. 2013년 초에 반덴버그 공군기지의 신규 발사대 건설을 완료한 SpaceX는 2013년 3월 텍사스 맥그리거에서 Merlin 1D 인증 시험을 종료하였다. 2013년 3월 Falcon 9 v1.0의 5회 발사 이후 그해 4월부터 기존 케이프 커내버럴 SLC 40 발사대는 Falcon 9 v1.1로 확장을 시작하였다.

2013년 3월, Elon Musk는 Falcon 9 v1.1의 재사용을 위해 플라이 백(fly-back) 테스트를 수행할 것이라고 발표하였다. 4월에는 Falcon 9 v1.1의 엔진 배열인 8각 배열(Octaweb)이 트위터로 처음 공개되었다. 8각 배열은 기존의 Falcon 9

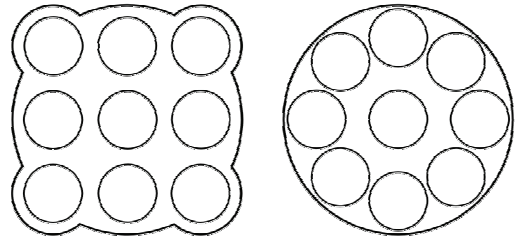


Fig. 4 The engine array of Falcon 9 v1.0 (left) and octaweb array of Falcon 9 v1.1 (right) [7].

v1.0에서 사용되었던 9개의 엔진의 바둑판식으로 배치하지 않고, 중앙에 한 개의 엔진을 사용하고 그 주위로 8개의 엔진이 배치되는 형태이다(Fig. 4). 중앙 엔진은 착륙 시점에 사용되는 엔진이다. 4월 이후 맥그리거의 시험장에서 단 시험이 본격적으로 진행되었고, 8월에는 반덴버그 공군기지의 발사대에 입고된 이후 9월에 Falcon 9 v1.1의 최초 발사가 이루어졌다.

Merlin 1D 엔진을 사용한 Falcon 9 v1.1은 100 kg급의 큐브셋 Cassiope를 5기 탑재하고 발사되었으며, 1단 재사용을 위한 실험도 동시에 진행하였다. 2단이 분리된 이후에 1단에 장착된 9개의 엔진 중 3개의 엔진을 재점화하여 진행속도를 감소시킨 이후에 중앙 엔진을 점화하여 재진입 속도를 떨어뜨리고 낙하 후 태평양 해수면에 들어오기 직전에 다시 중앙 엔진을 재점화하여 안정적으로 착륙할 수 있는지에 대한 시험이었다. Falcon 9 v1.1의 1단 속도 감소 시험과 재진입을 위한 중앙엔진 재점화에는 성공하였으나, 롤(roll) 제어에 실패하였고, 1단은 그대로 바다로 추락하였다. 2단은 1단과 분리 후 위성을 궤도에 올리기 위해 재점화하려고 시도했지만 점화에 실패하였고, 결국 Falcon 9의 여섯 번째 발사이자 Falcon 9 v1.1의 최초의 발사는 이렇게 실패하였다. SpaceX는 2단의 재점화 문제의 원인을 분석하였으며, 재점화 전에 점화제인 TEA-TEB가 동결되었고 이로 인해 점화를 시키지 못한 것으로 결론지었다. 이로 인해 Falcon 9 상단에 배치된 Merlin 1DV 엔진의 점화기 부위에 단열재가 긴급하게 추가되었으며, 추가 후 7번째 발사가 진행되었다[5].



Fig. 5 The octaweb firing a Falcon 9 v1.1 rocket [5].

Falcon 9의 7번째 발사는 산화제 탱크의 이상 압력 문제, 가스발생기 문제 등으로 지연되었으나, 2013년 12월 룩셈부르크의 SES 8 통신 위성을 탑재하고 $295 \times 80,000 \text{ km} \times 20.75 \text{ deg}$ 궤도에 성공적으로 안착하였다(Fig. 5). 이 미션은 Falcon 9의 거의 모든 추진제를 사용해야했기 때문에 재진입 시험을 시도하지 않았다. 이 때 발사 장소는 발사대 수정을 마친 케이프 커내버럴 SLC 40이었다.

2014년 1월 케이프 커내버럴에서 태국의 Thaicom 6 통신 위성을 싣고 Falcon 9의 8번째 발사가 성공적으로 진행되었다. 9번째 Falcon 9는 착륙 다리를 가진 최초의 모델로, 4월에 발사되었다. 6번째 Falcon 9 이후 처음으로 속도 제어 및 착륙 테스트를 다시 수행하였으며 1단 부스터의 3개 엔진을 재점화하여 수평 속도를 낮추었고 착륙 직전에 하나의 엔진을 재점화 하여 해수면에 다다랐을 때 속도를 0으로 만들 수 있는지 테스트되었다. Falcon 9의 9번째 모델에서, 부스터는 해수면에 착륙한 것처럼 속도를 0으로 제어할 수 있다는 것이 실험을 통해 확인되었다.

2014년 4월, SpaceX는 1단의 성공적인 회수를 위해 Falcon 9의 1단과 똑같이 9개의 Merlin 1D 엔진을 사용하는 Falcon 9R Dev 1 모델을 수직으로 비행시켰다가 착륙하는 시험을 진행하였다. Merlin 1C+ 엔진을 한 개만 장착하였던 Grasshopper와 달리 대형 탱크를 탑재하고 Merlin 1D 엔진을 9개 장착하였기 때문에, Grasshopper보다 높은 고도인 1000m까지 상승하였고 성공적으로 착륙하였다. 6월에는 Falcon 9R Dev 1의

세 번째 테스트를 진행하면서 착륙시 제어력을 높이기 위해 조종이 가능한 그리드 핀(grid fin)이 장착되었다. 8월, Falcon 9R Dev 1에 대한 5차 테스트가 진행되었는데, Merlin 1D 엔진을 3개 점화하여 수백 미터 높이로 상승하는 동안 엔진의 내장(onboard) 센서 중 한 개가 고장을 일으켜서 제어 기능이 상실되었고, 자동 파괴 시퀀스가 작동하여 동체가 지상으로 추락하기 전에 파괴되었다. 이 사고에 대한 검토 후에, Falcon 9 v1.1은 내장 센서를 중복 설계하는 것을 통하여 이러한 문제가 발생하였을 때 위험을 피할 수 있도록 하였다[5].

2014년 5월에 발사 예정이었던 10번째 Falcon 9는 지상 장비 문제, 헬륨 누출, 상단 압력 감소 및 TVC 액추에이터 문제로 인해 몇 차례 취소되었다. 몇 번의 발사 연기 이후, 7월에야 6개의 Orbcomm 데이터 중계 위성을 탑재하고 성공적으로 발사되었다. 1단은 그동안 축적된 데이터를 바탕으로 다시 착륙 시도를 하였으며, 해수면에서의 1단의 착륙 시도는 상대적으로 성공했지만 가라앉은 1단을 회수하지는 못했다. SpaceX는 11번째와 12번째 발사에서는 소모 모드(expendable mode)를 사용하여 1단 회수를 하지 않았고, 13번째 발사 중에 재진입 및 착륙 점화를 더 테스트한 후, 14번째 발사에서 1단 바지선 착륙을 처음으로 시도하였다.

Falcon 9의 14번째 발사는 2015년 1월에 이루어졌고, 이 때 4개의 그리드 핀을 사용하여 동체를 제어하였다. 그러나 착륙 직전에 그리드 핀에 대한 유압 공급이 소진되면서 제어력이 떨어지게 되었고 결국 바지선에 충돌하면서 바지선이 파손되었다. 1개월 후인 2015년 2월 15번째 발사가 진행되었고, 바지선에 착륙하려는 두 번째 시도를 진행하였다. 그러나 바지선 주위의 높은 파도 때문에 착륙이 어려울 것으로 판단되었고, 도중에 계획이 취소되면서 1단은 바지선을 보호하기 위해 바다에 충돌하였다.

16번째 발사에서는 2개의 미션을 동시에 수행하기 위해서 착륙을 시도하지 않았다. 17번째 발사(Serial No. 018)에 다시 착륙을 시도했지만 1단이 바지선과 강한 충격을 일으키며 파괴되었



Fig. 6 The explosion of the Falcon 9-020 rocket [5].

다. 18번째 발사(Serial No. 017) 때는 GTO로 4.5 톤급 위성을 발사하여 착륙을 시도하지 않았다.

2015년 6월, 19번째 발사(Serial No. 020) 때 이륙 2분 19초 후에 Falcon 9가 폭발하는 사고가 발생하였고, SpaceX는 제품 신뢰성에 큰 타격을 입었다(Fig. 6). SpaceX는 7월에 고장 원인에 대한 조사를 발표하였는데, 2단의 산화제 탱크 안에 있는 복합재 헬륨 고압 탱크 문제라고 밝혔다. 헬륨탱크를 지지하는 스트럿(strut) 중 하나가 3.2G 가속도를 초과하는 시점에 파손되었는데, 이로 인해 탱크 안에 있던 헬륨이 산화제 탱크로 유출이 되면서 2단 산화제 탱크에 과도한 압력을 가하여 폭발한 것으로 나타났다. 따라서 20번째 발사 예정이었던 Falcon 9(Serial No. 019)는 이 문제를 해결하기 위해 제품을 수리하였고, 이후 단 시험을 재수행 하였다. 이 문제를 해결하는 기간이었던 2015년 12월에 Merlin 1D+ 엔진을 사용하는 Falcon 9 v1.2(Serial No. 021)가 2015년 12월에 동부해안인 케이프 커내버럴에서 먼저 발사되었고, 최초로 지상착륙에 성공하였다.

2016년 1월 서부해안인 반덴버그 공군기지에서 발사된 Falcon 9-019는 샌디에고 서쪽 바지선에 안전하게 착륙하는데 성공했다. 그러나 착륙 직후에 착륙용 다리(landing leg) 중 하나가 완전히 고정되지 않으면서 단 전체가 쓰러져서 폭발하였다. Falcon 9-019의 마지막 착륙시도가 실패하면서 Falcon 9 v1.1의 모든 착륙시도는 실패로 끝났다.

5. Falcon 9 v1.2

케이프 커내버럴(Cape Canaveral) SLC 40 발사대와 반덴버그 공군기지(Vandenberg AFB) SCE 4E 발사대를 임대해오고 있던 SpaceX는 2014년 4월 케네디 우주센터(Kennedy Space Center) Launch Complex 39A 발사대를 대형 로켓인 Falcon Heavy를 위해서 20년 장기 임대하기로 NASA와 계약을 맺었다. 이 발사대는 아폴로 계획 때의 Saturn V 발사대이자 Space Shuttle의 최초 비행이 이루어졌던 발사대로 역사적인 의미가 컸기 때문에 많은 민간 우주업체들이 임대하고 싶어 했다. SpaceX는 Falcon Heavy 뿐 아니라 Falcon 9의 추력을 더 높인 Falcon 9 v1.2를 발사하는 주요 발사대로 개조하기 시작하였다. 2014년 5월 기존 Saturn V의 유서 깊은 구조물들을 철거하기 시작한 SpaceX는 Falcon Heavy의 추가 부스터를 위해서 새로운 철도 선로(rail track)를 만들었고 발사 패드 공사에 돌입하였다[2].

SpaceX는 2015년 1월 Falcon 9-014의 발사가 진행되고 최초의 바지선 착륙 시도가 이루어지던 시기에 Merlin 1D의 추력을 20% 증가시킨 엔진을 사용한 Falcon 9 v1.2를 개발 중에 있음을 공식 발표하였다. 이 시기는 100번째 Merlin 1D 엔진이 2014년 10월에 생산되었다고 발표한 이후였으며, 그 당시에는 주당 4대의 Merlin 1D 엔진이 양산되던 시점이었기 때문에 Falcon 9 v1.2의 발표 시기 때는 약 140개의 Merlin 1D 엔진이 생산되었다고 추정할 수 있다. Falcon 9 v1.1은 총 15회 발사되었으며 Falcon 9R Dev 1을 포함하였을 때 총 144개의 Merlin 1D와 15개의 Merlin 1DV가 비행에 사용되었음을 알 수 있다. 따라서 2015년 1월은 Merlin 1D의 양산이 종료되는 시점이었음을 알 수 있다[5].

2015년 3월, Musk는 Falcon 9 v1.2에서는 기존과 달리 GTO 임무를 하더라도 1단 착륙이 가능하게 될 것이라고 발표했다. 이를 위해서 산화제의 탑재 온도를 더 낮출 계획을 가지고 있다고 발표하였으며, 이를 통해 15%의 추력을 증가시킬 것이라고 하였다. Musk는 Falcon 9 v1.2를

‘Falcon 9 full thrust’라고도 표현하였으며, 업그레이드 된 1단은 Falcon Heavy의 사이드 부스터로 사용될 수 있다고 발표하였다.

업그레이드된 Merlin 1D 엔진(Merlin 1D+)은 2015년 7월에 시험 완료되었고, 8월에 최초의 Falcon 9 v1.2 비행용 1단 제품에 조립되었다. 맥그리거의 테스트 스탠드에서 15초 연소시험과 전 작동시간(full-duration) 연소시험을 마친 Falcon 9-021은 11개의 Orbcomm 위성을 탑재하고 케이프 커내버럴 발사장에서 2015년 12월에 발사되었다. 발사된 1단 부스터(Serial No. B1019)는 최초로 발사장 남쪽에 있는 Landing Zone-1 (LZ-1)에 착륙하는데 성공했다. 회수된 1단 부스터를 케이프 커내버럴 SLC 40으로 다시 이동시킨 SpaceX는 2-3초 동안 정적 연소 테스트를 통해 제품을 확인하였다. SpaceX는 최초로 회수에 성공한 B1019 부스터를 캘리포니아 호손(Hawthorne)에 있는 SpaceX 공장에 2019년 현재까지 계속 전시하고 있다.

Falcon 9-022는 2016년 3월 케이프 커내버럴에서 SES-9 통신 위성과 Boeing BSS-702HP 위성을 성공적으로 발사하였고, 해상 회수를 시도하였으나 연료 부족으로 인해 고속으로 추락하여 바지선에 구멍을 뚫었다. Falcon 9-023은 4월에 드래곤 10을 탑재하고 발사되어 임무에 성공하였으며, 해상 착륙 5번째 시도 만에 1단 부스터 B1021을 발사대 북동쪽으로 약 300km 떨어진

바지선 “Of Course Still I Love You”에 착륙시켰다. 해상 착륙에 처음으로 성공한 SpaceX는 이후 대부분의 착륙 시도에 성공하였다(Fig. 7). 착륙한 B1021은 4일 동안 바다에서 커내버럴 항구(Port Canaveral)로 운송되었으며, 그 후 착륙용 다리를 제거하고 재사용을 위해 캘리포니아 호손 공장으로 이송되었다. 재사용을 하기 위해 수리된 B1021은 11개월 후인 2017년 3월 Falcon 9-033에서 최초의 1단 재사용 발사체로 발사되었다.

2016년 4월 첫 해상 착륙에 성공한 이후 후속 발사체도 계속해서 착륙에 성공하던 SpaceX는 2016년 9월 케이프 커내버럴 SLC 40에서 Falcon 9-029의 정적 연소 시험을 진행하는 동안 폭발사고를 겪게 되었다(Fig. 8). 2단 산화제 탱크 내에 있던 복합재 헬륨 탱크에 초과 가압이 일어나 갑자기 폭발한 것으로 분석되었으며, 이로 인해 2단과 함께 탑재되어 있던 2억 달러짜리 AMOS 6 위성이 함께 파괴되어 버렸다. 2015년 6월 당시의 사고와 마찬가지로 2단 헬륨 탱크 부위의 문제였으며, 맥그리거 시험장에서 고장모드를 확인을 위한 극저온 부하시험이 진행되는 동안 모든 후속 발사가 중지되었다. 또한 이 사고로 케이프 커내버럴 발사대가 큰 손상을 입었기 때문에, 동부 해안에서의 발사 캠페인을 케네디 우주센터(Kennedy Space Center, KSC)의 SLC 39A 발사대로 이동하여 진행하기로 하였다.

2017년 1월 Falcon 9-029의 고장 분석이 끝난



Fig. 7 The first stage of a Falcon 9 v1.2 rocket descends to a landing on SpaceX's drone ship [6].



Fig. 8 The explosion of a Falcon 9-029 in Cape Canaveral SLC 40 [2].

이후, 서부 해안의 반덴버그 공군기지 SLC 4E에서 Falcon 9-030이 발사되었다. 탑재체로 10개의 IridiumNEXT 위성이 발사되었고, 발사 후 1단 부스터(Serial No. B1029)가 서부 해안에 있던 “Just Read the Instruction” 바지선에 착륙하였다. 이것은 SpaceX 최초의 서부 해안 착륙이었다. 2017년 2월, KSC SLC 39A 발사대에서 처음으로 Falcon 9-032가 발사되었으며, 지상 착륙장인 LZ-1에 성공적으로 착륙하였다[2].

2016년 4월 최초의 해상 착륙 이후 SpaceX는 Falcon 9 v1.2의 성능을 개선한 Block 5 모델을 발표하였다. Block 5 모델에 사용된 Merlin 1D++ 엔진은 Merlin 1D의 추력을 86.183톤으로 증가시킨 엔진이었으며, 1단 회수 조건의 발사 서비스 비용으로 6,200만 달러를 제시 하였다. 최초의 Block 5 모델은 2018년 5월에 발사하였던 Falcon 9-055였다. Bangabandu 1 위성과 Thales Alenia Space Spacebus 400B02 위성을 실은 Falcon 9-055는 성공적으로 KSC에서 발사되었고, 1단 부스터(Serial No. B1046)는 해상 착륙에 성공하였다. 당시에 회수되었던 B1046 부스터는 일부 점검 이후에 2018년 8월에 Falcon 9-061의 1단에 탑재되어 케이프 커내버럴에서 발사되었고, 2차 회수된 이후 12월에 Falcon 9-065의 1단에 탑재되어 반덴버그 공군기지에서 발사되어 최초 3회 발사한 부스터이자 SpaceX의 3개 발사장을 모두 거친 최초의 부스터로 기록에 남게 되었다. 세 번째 발사에는 한국의 KAIST 차세대 소형 위성이 여러 다른 소형 위성들과 함께 탑재되어 있었다[2]. 2018년 5월 Block 5 모델의 발사 성공 이후에 재사용성을 증가시켰다고 판단한 SpaceX는 Falcon 9의 표준 가격을 5,000만 달러로 하향 조정하겠다고 발표하였지만[8], 실제 공식 홈페이지에서는 계속 6,200만 달러로 표기하고 있다[1].

6. Falcon Heavy

Falcon Heavy의 개념은 SpaceX의 초창기 때부터 존재해 왔지만, 그것이 실현되기까지는 오

랜 시간이 걸렸다. Falcon 9에 2개의 Falcon 5 부스터를 사이드 부스터로 사용한 Falcon 9S5의 개념과 Falcon 9에 2개의 Falcon 9 사이드 부스터를 사용한 Falcon 9S9의 개념은 Falcon 1의 첫 번째 모델을 발사하기 전이었던 2005년 9월에 발표되었다. 2007년 SpaceX는 Payload User's Guide에서 Falcon 5를 삭제시킴으로 Falcon 9S9의 개념을 Falcon Heavy로 명명하였고, Merlin 1C엔진을 사용한 Falcon Heavy 개발 계획을 발표하였지만 실현되지 않았다. 이후 2011년 4월에 SpaceX는 Merlin 1D를 27개 사용하여 LEO에 53톤의 탑재체를 올릴 수 있는 Falcon Heavy 개발 계획을 발표하였고, 2013 반덴버그 공군기지에서 첫 번째 발사 계획을 내 놓았지만, Falcon 9 v1.2의 성능이 업그레이드되면서 역시 실현되지 못했다.

2015년 SpaceX는 Merlin 1D+와 함께 Falcon 9 v1.2를 발표했으며, 이 엔진을 이용한 Falcon Heavy는 GTO 임무에 6톤 이상의 페이로드를 올릴 수 있다고 예측했다. Merlin 1D+를 사용하는 Falcon Heavy는 부스터 한 코어 당 추력이 694톤급이었고, 총 2082톤급 이륙 추력을 가지고 있었다[2].

SpaceX는 최초의 Falcon Heavy Demo 발사를 위해서 재사용 부스터를 적극 활용하였다. Falcon Heavy Demo의 사이드 부스터로 사용되었던 B1023 부스터와 B1025 부스터는 각각 2016년 5월에 발사된 Falcon 9-025와 7월에 발사된 Falcon 9-027에서 회수된 부스터였다. B1023 부스터는 회수 후 2017년 4월 맥그리거 시험장에서 재시험되었으며, 5월에는 Falcon Heavy의 중앙 부스터인 B1033의 연소 테스트가 수행되었다[9].

2017년 12월, Falcon Heavy Demo는 KSC의 SLC 39A 발사 패드로 옮겨졌으며, 2018년 1월에 추진제 주입 및 정적 연소 시험을 수행하였고, 최종적으로 2월에 발사하였다. 27대의 멀린 1D+ 엔진을 탑재하고 총 추력 2128톤으로 이륙한 Falcon Heavy는 시험용 탑재체로 1250 kg의 테슬라 로드스터를 태우고 화성으로 발사되었다. 사이드 부스터는 2분 29초 후에 엔진이 정지되



Fig. 9 Lift of Falcon Heavy Flight 2 taken by Pauline Acalin [10].

었고 2분 33초 후에 분리되었다. 중앙 부스터는 대부분의 연소 시간 동안 더 낮은 추력으로 비행하다가 측면 부스터가 분리된 후 25초를 더 연소하고 2단과 분리되었다. 2단은 세 번의 재점화를 실시하면서 화성으로 날아갔다. 사이드 부스터들은 각각 케이프 커내버럴 LZ1과 LZ2에 착륙했지만 중앙 코어 부스터는 착륙 시점에 재점화에 실패하면서 대서양으로 추락하였다. Elon Musk는 Falcon Heavy Demo 버전에 사용된 돈은 5억 달러라고 발표하였다[9].

SpaceX는 2019년 4월에 6,465 kg의 Arabsat 6A를 싣고 GTO로 두 번째 Falcon Heavy를 발사하였다. 이 때 사용된 부스터는 Merlin 1D++ 엔진을 사용한 Block 5 모델이었다. B1055 부스터는 코어 부스터로, B1052 부스터 및 B1053 부스터는 사이드 부스터로 각각 사용되었다. B1052와 B1053은 각각 LZ-1과 LZ-2에 착륙했으며, B1055는 Of Course Still I Love You 바지선에 착륙함으로써 SpaceX는 최초로 3개의 부스터를 착륙시키는데 성공하였다. 그러나 B1055는 바지선을 케이프 커내버럴까지 이송시키는 동안 대서양의 높은 파도에 의해 유실되어 재사용되지는 못했다[9].

7. 한국의 발사체 개발 전략 검토

7.1 다양한 미션 개발

SpaceX는 초기 개발 단계에서 NASA의 지원 아래 많은 발사 기회를 얻었기 때문에 계속된



Fig. 10 Landing of both Falcon Heavy side boosters [10].

Table 1. Percentage of CRS mission in full mission of Falcon 9.

Year	Model	CRS of NASA	Total	CRS/Total (%)
2010-2013	Falcon 9 v1.0	5	5	100.0
2013-2016	Falcon 9 v1.1	5	15	33.3
2015-2018	Falcon 9 v1.2	9	47	19.1
Total		19	67	28.4

발사 시험과 착륙 시험을 거치면서 안정적인 발사체를 개발할 수 있었다. 초기 Falcon 9 개발할 당시부터 NASA는 드래곤 탑재체를 통해 ISS에 물자를 공급하는 COTS 미션 및 CRS 미션을 SpaceX와 계약하였고, 이를 통해 SpaceX는 고가의 위성을 쏘는 대신 비교적 저렴한 탑재체를 발사하여 위험도를 낮출 수 있었다. 이러한 발사를 통해 얻은 경험으로 상업 발사 시장에 진출할 수 있었다. Falcon 9 v1.0을 사용하였던 2013년도까지는 COTS 미션 3회, CRS 미션 2회로 모든 미션이 NASA의 물자 공급 미션과 관련된 것이었다(Table 1). Falcon 9 v1.1을 사용하였던 총 15회의 발사에서 5회가 CRS 미션이었다. 2015년에서 2018년까지의 Falcon 9 v1.2의 총 발사 시도는 47회였고, 그 중 9회가 CRS 미션이었다. 종합해보면, 2018년도까지 Falcon 9의 총 발사 시도 67회 중 19회가 CRS 미션일 정도로 지금까지 약 30% 정도의 미션이 NASA의 지원을

받았다고 할 수 있다(Table 1).

한국에서는 발사체의 신뢰성을 높이기 위해 많은 발사가 필요하지만, 이에 대한 수요를 많이 발굴해내지는 못하고 있다. 신뢰성 높은 발사체의 개발은 우주 등급의 부품 소재 개발을 위해 필요한 IOD(In-orbit demonstration)와 같은 많은 새로운 수요들을 생성하고 지원하는 정책이 뒷받침 되었을 때 가능하다고 할 수 있다.

7.2 발사 서비스 시장 진입이 가능한 발사체 개발

2016년 4월 SpaceX는 Falcon 9 v1.2의 발사 서비스 비용을 6,200만 달러로, Falcon Heavy의 발사 서비스 비용을 9,000만 달러로 제시한 후 2019년 전반기까지 이 가격을 유지하고 있다. 이러한 낮은 발사 서비스 비용을 통해 SpaceX는 2018년에 전 세계에서 발사하였던 107회 발사 중 21회를 차지하였고, 10톤 이상 페이로드를 가지고 있는 대형 발사체의 비중을 보았을 때, 전체 47회 중 21회를 발사하여 전체 대형 발사 서비스 시장의 45%를 차지하였다(Table 2). 상업 발사와 관계가 없는 중국 발사체를 제외하면, 그 비중은 58%까지 늘어나 이미 대형 발사체 시장의 대부분을 점유하였다고 볼 수 있다.

Falcon 9 v1.2 Block 5의 궤도 투입 능력은 LEO까지 소모성 모드시 22.8톤, 재사용시 16.8톤이다. 한국형발사체는 250km의 LEO에 약 2.6톤을, 700 km SSO에 1.5톤을 투입할 수 있도록 개발되었으며, 서비스 비용은 연간 1회 발사 시 94M\$, 연간 2회 발사 시 80M\$로 추정되었다 [11]. 대형 발사체에서는 Falcon 9과 Falcon Heavy가 이미 거의 대부분의 시장을 잠식하고 있기 때문에, 한국이 발사체 시장에 진입하기 위해서는 Falcon 9보다 중소형 발사체를 개발하는 것이 더 효과적이라고 할 수 있다. 현재 개발 중인 한국형 발사체의 성능을 높이고 가격을 낮추어 Falcon 9 서비스 가격의 절반 정도인 3,100만 달러(31M\$)에, Falcon 9의 1/3 정도의 페이로드(5톤)를 LEO에 보낼 수 있다면(GSLV-MkII 급과 비슷), 발사 서비스 시장에서 경쟁력을 갖출 수 있을 것으로 보인다.

Table 2. Comparisons of cost and payload of LV launched in 2018.

Vehicle	Cost(\$)	LEO Payload (ton)	2018 Launches
Electron	6M	0.225	3
Kuaizhou 1A		0.3	1
Long March 11		0.7	3
Epsilon	39M	1.5	1
Rokot	41.8M	1.95	2
VEGA	37M	1.963	2
PSLV-CA	21M	2.1	2
Soyuz-2-1v		2.8	1
Long March 2D	30M	3.5	8
PSLV-XL	31M	3.8	2
Long March 2C		3.85	6
Long March 4B	50M	4.2	2
Long March 4C		4.2	4
GSLV-MkII	47M	5	2
Soyuz-FG		6.9	5
Soyuz-2.1a		7.02	4
Soyuz-2.1b		8.2	3
GSLV-MkIII	54.2M	8	1
Antares 230	80-85M	8	2
Long March 3A	70M	8.5	2
Soyuz-ST-B	80M	9	2
Long March 3C		9.1	1
Atlas V 401	109M	9.797	1
Long March 3B/E		11.5	11
H-IIA	90M	10-15	3
Atlas V 411	115M	12.150	1
H-IIB	112.5M	16.5	1
Falcon-9 Reusable	62M	16.8	20
Atlas V 541	145M	17.443	1
Atlas V 551	153M	18.814	2
Ariane 5 ECA, ES	165-220M	21	6
Delta IV-Heavy	350M	28.79	1
Falcon Heavy Reusable	90M	57	1

7.3 재사용 발사체 개발

SpaceX는 Falcon 9 v1.1을 개발하는 동안 재사용 발사체에 대한 1단 부스터 착륙시험을 계속 수행하였으며, 결국 Falcon 9 v1.2에서 안정적인 부스터 착륙 및 재사용을 달성할 수 있었다. SpaceX에서 처음 계획한 대로 2단까지 재사용하는 것은 성공하지 못했지만, 1단 부스터의 재사용만으로도 상당한 비용 절감을 가져 왔으며 발사 비용을 낮추고 다른 업체들에 비해 경쟁력을 확보할 수 있었다. 또한, 최근에는 페어링을 바다에서 Ms. Tree라는 배로 받아내는데 성공하여 발사 비용을 낮추고 이윤을 극대화시키고 있다. Elon Musk는 Falcon 9의 1단 부스터가 전체 발사 비용의 60% 조금 안 되는 수준이며, 2단이 20%, 페어링이 10%, 나머지 운용비용이 10% 정도라고 하였다[8]. 만약 1단을 재활용하는 상황에서는 1단 부스터 비용이 들어가지 않고, 나머지 40% 정도로 발사 및 회수가 가능한 것으로 보인다. 따라서 2회 발사 때는 200%의 비용이 드는 것이 아니라 140%의 비용으로 발사할 수 있게 된다. 만약 페어링까지 재사용하면 130%의 비용으로 2회 발사할 수 있다. 3회를 페어링까지 재사용하여 발사한다면 160%의 비용으로 발사가 가능하여 6200만 달러의 발사 비용이 1회 발사시의 원가(100%)라고 가정하면, 3회 발사 시에는 총 발사 서비스 비용 1억 8600만 달러(300%) 중 8680만 달러(140%)가 SpaceX의 이윤으로 남게 된다.

한국에서도 재사용 가능한 발사체를 개발하면 발사 비용을 줄일 수 있기 때문에, 같은 비용을 투자하더라도 더 많은 발사를 할 수 있어 우주로의 접근이 더 용이해 질 수 있고 우주 산업을 더 확산시킬 수 있다. 또한 경쟁력 있는 발사 서비스 비용을 제공하는 것이 가능해 질 수 있기 때문에 민간에게 상업 우주 시장에 진출할 수 있는 기회를 더 많이 제공할 수 있다.

SpaceX는 마지선을 띄워서 해상 착륙을 수행하거나 Cape Canaveral Landing Zones 1과 2에 지상 착륙을 수행하고 있다. 섬이 많은 우리나라의 지형적 특성을 고려한다면 나로우주센터로부터 발사체 궤적 부근의 무인도에 착륙하는 것



Fig. 11 Dong-Am located in the southern part of Naro Space Center [12].

으로 재사용 발사체를 개발하는 것이 가능하다. 예를 들어, 나로도에서 남쪽으로 약 44 km 정도에 위치한 백도 군도의 가장 동쪽에 있는 직경 약 50 m 정도 되는 바위섬 “동암”(Fig. 11)에 착륙하는 것도 한 가지 방법이다. 만약, 외나로도 발사대 인근에 착륙을 시도할 때, 근처에 인가가 있고 각종 시설이 밀집되어 있는 우주센터의 현 상황은 착륙 실패에 따른 위험이 많다. 따라서 남해에 있는 무인도를 착륙장화 하여 착륙시키고, 다시 나로우주센터로 마지선을 사용하여 끌고 오는 방법이 우리나라의 환경에 적합한 재사용 발사체 개발안으로 보인다.

7.4 동일한 부스터를 사용한 대형 발사체 개발

SpaceX의 Falcon Heavy 개념은 2005년부터 개발 계획을 가지고 있었지만 실제로 실현된 것은 2018년이였다. Falcon Heavy의 기본 개념은 Falcon 9의 양쪽에 동일한 부스터를 결합하여 더 무거운 탑재체를 발사하는 것으로서 Falcon 9 탑재 중량의 거의 3배에 해당하는 탑재체를 쏘아 올릴 수 있다. 이러한 개념은 Delta IV Heavy와 같이 미국의 매우 전통적인 부스터 결합 방식이며 동일 부스터를 사용하여 개발 비용

을 최소화 할 수 있다. 다만, SpaceX는 Falcon Heavy를 구성하였을 때 부스터에 무려 27개의 엔진이 클러스터링 되어 발사해야 한다는 단점이 있었다. 부스터에 27개 정도의 많은 엔진을 클러스터링 했던 발사체는 그동안 Saturn-V와 경쟁했던 소비에트 연방의 유인 달 탐사선 N-1 정도 밖에 없었다. 30개의 NK-15 엔진을 탑재하였던 N-1은 결국 엔진 제어에 실패하며 결국 폐기 되었지만, SpaceX는 27개의 엔진을 잘 제어 하였을 뿐 아니라 3개의 부스터를 착륙시키는데도 성공하였다. 1960년대와는 다르게 전자 기술이 많이 발전하여 현재는 많은 엔진을 효율적으로 제어할 수 있는 것으로 알려져 있다.

따라서 큰 발사체에 대한 수요가 크지 않은 한국의 입장에서는 싱글 코어 대형 발사체가 아니라 Falcon Heavy와 같은 부스터를 결합한 모델로 여러 개의 엔진을 결합한 대형 발사체를 개발하는 것이 더 효과적이라고 할 수 있다. 한국에서 대형 정지궤도 발사체를 개발하려면 개발 비용과 시간이 많이 들 수밖에 없지만, SpaceX와 같이 이미 개발한 부스터를 사이드 부스터로 결합시켜서 발사한다면 개발 비용과 개발 시간을 줄일 수 있다. 또한, Falcon Heavy의 모델과 같이 재사용을 위해 3개의 부스터를 모두 회수할 수 있다면 발사 비용을 소모성 발사체에 비해 크게 줄일 수 있으므로 역시 검토가 필요하다.

7.5 고압형 가스발생기 사이클 부스터 개발

아폴로 프로젝트가 끝난 후, Falcon 1이 개발 될 때까지 미국에서 케로신(kerosene) 가스 발생기 사이클 엔진을 사용한 발사체는 잘 개발되지 않았다. 미국에서는 SSME와 같은 고압 수소 다단연소 사이클 엔진을 주력 엔진으로 개발하였고, 러시아는 RD-170과 같은 고압 케로신 다단연소 사이클 엔진을 주력 엔진으로 개발하였다. 그러나 케로신 가스발생기 사이클 엔진을 탑재한 Soyuz가 1960년대 이후 50년이 넘는 세월동안 유인 우주 발사체로 오랫동안 안전하게 사용되어 왔고, 수소 다단연소 사이클 엔진을 사용한 스페이스 셔틀은 여러 사고로 인해 결국 폐기되면서 구형 방식이라고 알려진 케로신 가스 발생

기 사이클 엔진에 대한 평가가 달라지고 있다. SpaceX는 세계에서 가장 높은 무게 당 추력비를 가진 케로신 가스 발생기 사이클 엔진을 개발했으며, 여러 구성 부품들을 모듈화하여 저렴하게 생산함으로써 케로신 가스 발생기 사이클 엔진의 잠재력이 재검토되고 있다. 현재 SpaceX는 Falcon 9 v1.2 Block 5 모델을 개발하면서 연소 압력이 120 bar로 추정되는 Merlin 1D++ 엔진을 출시했다. 이 엔진의 연소 압력은 가스 발생기 사이클 엔진으로는 상대적으로 높은 편이다. 따라서 이것은 현재 60 bar 정도의 연소 압력을 가진 한국형 발사체 75톤 엔진의 후속 엔진 개발에 중요한 시사점이 될 수 있다고 판단된다. SpaceX의 개발 과정을 참고하여 Merlin 1D++ 엔진과 같이 압력을 높이고 엔진 무게 당 추력비를 높이며 다양한 구성품의 중량 및 모듈화를 통해 경쟁력 있는 고압 가스발생기 사이클 부스터 엔진을 개발하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

7.6 적층 제조를 통한 비용 절감 및 제작시간 단축

3D 프린팅으로 알려져 있는 적층 제조(additive manufacturing, AM) 방식은 복잡한 형상의 제품을 쉽게 생산할 수 있으며 토폴로지(topology) 최적화를 사용하여 불필요한 중량을 줄일 수 있다. 또한 시설 투자비용이 많이 들지 않으므로 맞춤형 소량 생산에 적합하다. 따라서 AM 방식은 항공 우주 분야와 바이오 분야에 널리 적용되고 있다. SpaceX에서도 또한 ISS에 도킹되는 드래곤 모듈에 SLM(Selective Laser Melting) 방식으로 제작한 소형 엔진인 Super Draco를 사용했으며, Merlin 1D 엔진의 산화제 밸브 등에 적층 제조 방식을 사용함으로써 비용을 절감하였고, 생산 시간을 단축시켰다. 최근에 발사에 성공한 Electron 발사체의 Rutherford 엔진은 대부분의 구성 요소가 적층 제조 방식으로 만들어 짐에 따라 적층 제조를 사용하여 비용과 발사체 제작 시간을 줄이고 있다. 따라서 한국형 후속 발사체의 개발도 적층 제조를 사용하여 제작한 부품을 활용하여 비용을 줄이고 제작 시간을 단축해야 할 것이며, 이를 위해 적극적인 적층 제조 기술 개발이 필요하다.

8. 결 론

후 기

본 연구에서는 SpaceX의 발사체 개발 과정에 대해서 정리하였으며, SpaceX의 개발을 참고할 때, 한국의 후속 발사체 개발에 고려해야 할 점을 정리하면 다음과 같다.

- (1) SpaceX는 초기에 CRS와 같이 ISS용 화물을 발사하는 미션을 통해 경험을 많이 쌓았고, 이로 인해서 상업 위성 발사 시장에 진출할 수 있었다. 후속 발사체 개발에 있어서도 고가의 위성 발사 외의 다양한 미션을 발굴하여 정책적으로 뒷받침 할 때 신뢰성 높은 발사체 개발이 가능하다.
- (2) SpaceX는 현재 발사체 시장을 재편하였고, 저가로 급속히 인공위성 수요를 끌어들이고 있기 때문에, 후속 발사체의 개발은 발사 서비스 시장을 고려해야 하며, 현재 Falcon 9보다는 낮은 가격으로 개발해야 경쟁력을 가질 것으로 보인다.
- (3) 1단을 재사용 하는 것을 통해 발사비용을 많이 낮추는데 성공한 SpaceX와 같이 후속 발사체는 재사용 발사체를 고려하여 비용을 낮출 필요가 있다.
- (4) 한국의 대형 발사체를 개발하고자 할 때, SpaceX의 Falcon Heavy 모델을 적극 참고할 필요가 있으며, 동일 부스터를 병렬로 묶어서 발사하는 것을 통해 개발 비용을 절감할 수 있다.
- (5) 현재 한국이 개발한 가스발생기 사이클 엔진을 개량하여 고압형 가스발생기 사이클 부스터 엔진을 개발하는 것을 통해 엔진의 무게 당 추력비를 늘리고 경쟁력을 늘리는 방향을 검토할 필요가 있다.
- (6) 현재 활발히 연구되고 있는 적층 제조 기술을 개발하여 발사체 부품의 제작비용을 절감하고 제작 시간을 단축하여 경쟁력 있는 후속 발사체를 개발해야 한다.

본 논문은 한국형발사체개발사업(KSLV-II)의 지원에 의하여 작성되었다.

References

1. World Wide Web location, <https://www.spacex.com>
2. "Space Launch Report: SpaceX Falcon 9 v1.2 Data Sheet," World Wide Web location_ <http://www.spacelaunchreport.com/falcon9ft.html>, updated May 04, 2019
3. "Space Launch Report: SpaceX Falcon Data Sheet," World Wide Web location <http://www.spacelaunchreport.com/falcon.html>, updated Jan 08, 2014.
4. "Space Launch Report: SpaceX Falcon 9 Data Sheet," World Wide Web location <http://www.spacelaunchreport.com/falcon9.html>, updated May 01, 2017
5. "Space Launch Report: SpaceX Falcon 9 v1.1 Data Sheet," World Wide Web location_ <http://www.spacelaunchreport.com/falcon9v1-1.html>, updated Sep 08, 2017
6. World Wide Web location <https://spaceflightnow.com/2018/08/05/spacex-set-to-reflect-fly-first-falcon-9-block-5-booster-tuesday/>
7. "Falcon 9 v1.1," World Wide Web location https://en.wikipedia.org/wiki/Falcon_9_v1.1, updated Apr 15, 2019
8. "With Block 5, SpaceX to increase launch cadence and lower prices," World Wide Web_location_ <https://www.nasaspaceflight.com/2018/05/block-5-spacex-increase-launch-cadence-lower-prices/>, updated Apr 15, 2019
9. "Space Launch Report: SpaceX Falcon Heavy Data Sheet," World Wide Web location, <http://www.spacelaunchreport.com/falconH>

- .html, updated Apr 15, 2019
10. World Wide Web location, <https://www.teslarati.com/spacex-falcon-heavy-block-5-launch-photos/>
 11. Yoo, D.S., Kim, H.R., Choi, J.K., and Chang, Y.K., "Estimation of Production and Operation Cost of KSLV-II using TRANSCOST," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 39, No. 6, pp. 567-575, 2011.
 12. "Kakao Map," World Wide Web location, <https://map.kakao.com>