

한국형 발사체 누리호 개발 이야기

공과대학 항공우주공학과 명예교수 노오현

개발 배경

한국형발사체 누리호는 “우리 위성을, 우리 발사체로, 우리 땅에서 쏜다”는 캐치프레이즈 아래 우리나라의 독자적인 우주수송 능력 확보를 위해 과학기술정보통신부(사업착수 당시 교육과학기술부)가 한국항공우주연구원(이하 항우연)을 주관기관으로 하여 2010년 3월부터 2023년 6월까지 국비 1조 9,572억 원을 투입하여 개발하는 우주발사체다. 누리호는 1.5톤급 실용위성을 고도 600~800km의 태양동기궤도에 투입할 수 있는 3단형(三段形) 우주발사체다.

누리호 개발사업을 주관한 한국항공우주연구원은 1989년에 설립된 이후 과학로켓(Korea Sounding Rocket, KSR) 개발에 착수하여 1993년 1단형 고체추진 과학로켓(KSR-I), 1998년 2단형 고체추진 과학로켓인 중형과학로켓(KSR-II) 개발을 완료했고 이어서 2002년 11월 28일에는 한국 최초의 액체추진 과학로켓(KSR-III)을 성공적으로 발사했다. 이전의 과학로켓과 달리 KSR-III에서 액체추진기관을 채택하게 된 이유는 로켓 기술이 대표적인 이중용도 기술이어서 군사적인 목적으로 쉽게 전용될 수 있는 까닭에 민간에서 연구 개발하는 데 많은 국제적인 제약이 따랐고, 훗날 우주발사체로의 확장성을 고려한 결정이었다. 과학로켓 개발 과정에서 습득된 다양한 기술은 우리나라 최초의 자력 개발 우주발사체인 누리호를 개발하는데 크게 기여했다.

액체추진 과학로켓 이후 본격적인 우주발사체 개발에 착수했다. 100kg급 소형위성을 지구 저궤도에 투입할 수 있는 소형위성발사체(KSLV-I, Korea Space Launch Vehicle) 나로호가 바로 그것이다. 나로호는 우리나라 최초의 우주발사체로서 2002년 8월부터 2013년 4월까지

국비 5,025억 원을 투입하여 개발했으며, 그 당시 우리나라가 보유한 액체추진기관 기술보다 한 단계 높은 기술이 필요하여 러시아와의 협력사업으로 추진되었다. 나로호는 2단형(二段形) 우주발사체로서 고성능 액체로켓엔진을 탑재한 1段 로켓은 러시아 흐루니체프(Khrunichev)社로부터 기술협력으로 도입하고 고체 로켓엔진을 장착한 2段 로켓과 위성 보호 덮개인 탑재 페어링(Fairing)은 국내에서 개발했다. 두 번의 발사 실패(2009년 8월, 2010년 6월)와 여덟 번의 발사 연기 끝에 마지막 시도(試圖)로서 2013년 1월 13일 오후 4시 나로우주센터를 이륙한 나로호 3호기는 이륙 후 540초에 탑재 위성인 나로과학위성을 목표 궤도에 성공적으로 올려놓았고 이로써 마침내 대한민국 최초 우주발사체의 개발을 성공적으로 완수했다.

나로호 개발을 통해 우주발사체 설계에서부터 발사 운영에 이르는 전 과정을 경험한 전문 인력을 확보하고 산·학·연 협동 연구 체제를 구축하는 등 우주발사체 개발을 위한 초석을 마련했다. 또한 참여 연구자에게는 고통스러운 과정이었지만 여러 번의 발사 연기와 발사 실패를 경험하면서 결함 발생 시 분석하고 대처하는 노하우도 갖게 되었다는 부수적인 성과도 있었다.

나로호 개발사업의 또 다른 주요 성과는 우주개발을 위한 전초기지(前哨基地)인 나로우주센터의 확보라 할 수 있다. 나로우주센터의 발사대와 발사체 조립동(組立棟)을 포함한 주요 지상설비는 러시아에서 설계했고 건설은 국내 기업에서 담당하여 2009년 6월에 준공(竣工)했다. 이로써 우리나라는 세계 열세 번째의 우주센터 보유국이 되었으며, 동시에 누리호 등 자력 우주개발을 위한 기반시설을 갖게 되었다.

누리호 개발사업 착수

러시아와 기술협력을 통해 개발된 나로호와는 달리 온전한 국내 기술로 개발 예정이었던 한국형발사체 누리호의 개발 계획은 나로호 개발사업이 한창 진행되던 2006년부터 검토되었고, 2009년에는 예비타당성 조사를 통과하여 2010년 3월부터 사업에 착수되었다. 하지만 당시 나로호 1차 비행시험(2009. 08. 25) 실패에 따른 원인 분석과 뒤이은 2차 비행시험(2010. 06. 10)의 실패, 그리고 실패 원인 분석, 마지막 3차 비행시험 준비 등으로 상당수의 연구원은 나로호의 성공적인 마무리를 위해 몰두할 수밖에 없었고 이에 따라 누리호 개발사업은 나로호 3차 비행시험의 성공적으로 완료된 2013년이 되어서야 본격적으로 추진될 수 있었다.

누리호 개발사업은 총 3단계로 진행되었는데, 1단계에는 발사체 시스템 설계 및 예비설계 검토, 액체추진 시험설비 구축, 7톤급 액체엔진 조립 및 지상 연소시험을 목표로 하고, 2단계

에는 발사체 및 엔진 상세 설계, 75톤급 지상용 엔진과 시험발사체 개발을 완료하는 것을 목표로 했다. 최종 3단계에는 3단형 발사체 시스템 개발을 완료하고 두 번의 비행시험으로 발사체 성능검증을 완료하는 것을 목표로 했다.

누리호는 전장(銓長) 47.2m, 최대직경 3.5m, 이륙중량 200톤으로서 이 중 추진제 무게가 180톤에 이른다. 누리호 1단에는 진공추력 75톤급 액체엔진 4기를 묶어 총 300톤의 추진력을 내고, 2단에는 1단 75톤급 엔진을 고공(高空)용으로 변경한 엔진 1기, 그리고 3단에는 진공추력 7톤급 엔진 1기를 사용한다. 이들 엔진은 액체추진과학로켓(KSR-III)에 사용했던 추력 13톤급 가압식 로켓엔진보다 기술적으로 한 단계 진보된 펌프공급방식 로켓엔진이며, 추진제로는 케로신과 액체산소를 사용한다. 미국과 러시아와 같은 우주발사체 선진국에서는 일반 케로신에 비해 밀도가 높고 로켓 연료로서 추가적인 장점을 갖는 로켓 전용 케로신을 사용하지만 국내 수입이 불가능하고 국내 자체 생산 또한 기술적 측면을 포함한 여러 가지 요인으로 여의치 않아 일반 항공유인 Jet-A1을 연료로 사용한다.

액체로켓엔진은 누리호 개발사업에서 가장 개발 난이도가 높고 장기간의 개발 기간이 소요되는 부품으로 성공적인 개발 여부가 관련 전문가들의 초미의 관심사였는데 다행히 이런 점을 고려하여 선행사업인 나로호 개발 기간 동안 액체로켓엔진 핵심기술 확보를 위해 추력 30톤급 펌프공급방식 로켓엔진 주요 부품에 대한 선행연구를 상당한 수준까지 진행했다. 그 기술과 경험을 누리호 엔진 개발에 십분 활용할 수 있게 된 것은 누리호 개발사업에서 말할 수 없이 큰 도움이었다.

누리호 액체엔진 개발을 위해서는 시험설비 구축이 급선무였다. 당시 국내에는 나로호 개발 기간 동안 30톤급 액체엔진 선행개발을 위해 보유하고 있던 일부 시험설비가 전부였기 때문에 75톤급 액체로켓엔진 개발을 위해서는 모든 시험설비를 새로 구축해야 했다. 2012년부터 이들 시험설비 구축이 본격 착수되어 2014년 4월 나로우주센터에 엔진 핵심부품인 연소기와 터보펌프 시험설비가 준공되었고, 이후 2017년 4월까지 엔진시스템 및 추진기관시스템 시험설비 등 10종의 시험설비 구축을 완료했다. 이로써 나로호 개발사업 기간 중 우주발사체 조립 및 발사 시설 위주로 운영되었던 나로우주센터는 누리호 개발을 위한 대규모 시험장으로 변모했다.

난관에 봉착하다

75톤급 엔진 구성품 중 연소기에 대한 연소시험은 나로우주센터에 해당 시험설비 구축 후 설비 검증기간을 거쳐 2014년 10월에 처음 이루어졌다. 시험에 사용된 연소기는 75톤급 기술

검증모델 1호기로서 누리호 개발사업의 기술적 타당성을 보이기 위해 나로호 개발 기간 동안 선행 연구개발을 통해 제작된 기술 검증용 모델이었다. 이 연소기는 2009년에 제작되었으나 시험설비가 준비되지 않아 기존 30톤급 연소기 시험설비에서 설계 작동압력 60기압의 절반 수준인 30기압 저압 조건에서만 연소시험이 가능했고, 그 결과 특이사항이 발견되지 않아 성공적인 개발이 기대되던 연소기였다. 준비된 시험 시제를 손에 들고 시험설비가 완공될 때 까지 5년을 기다려온 상황이었기에 큰 기대 속에 첫 연소시험이 이루어졌다. 하지만 3초간 짧게 수행된 설계조건 연소시험에서 뚜렷한 고주파 연소불안정 현상이 관찰되었고 연소기의 부분적 손상까지 발생했다. 고주파 연소불안정은 추진제 연소과정에서 발생하는 다양한 주파수 대역(帶域)의 섭동이 연소실 내부의 음향장과 공진을 일으켜 진동 에너지가 특정 주파수로 집중되어 압력섭동이 급격히 증폭되는 현상을 말한다. 고주파 연소불안정은 강한 진동과 높은 열전달을 수반하여 심각한 경우 엔진 파손에까지 이르게 하는 치명적인 영향력을 가지고 있으며, 현재까지도 이론적으로 완전히 정복하지 못하고 경험적 해결책에 의존하는 기술적 난제로 남아있다.

연구진은 확연한 연소불안정을 보여주는 시험 데이터와 그로 인한 연소기의 부분적 손상 까지 눈으로 확인했지만 혹시라도 연소불안정이 아닌 다른 원인에 의해 발생한 현상일 가능성을 염두에 두고 동일 조건에서 확인시험을 수행하기로 했다. 손상된 연소기를 수리하여 수행한 재시험에서 고주파 연소불안정은 이전 시험과 동일하게 발현되었고, 그로써 당시 연소기 설계가 고주파 연소불안정에 취약하여 개선이 필요함을 확인하게 되었다.

누리호 개발 연구진은 액체추진 과학로켓 개발 중에도 13톤급 가압식 액체로켓엔진에서 동일한 문제를 경험했기에 그 해결 과정이 얼마나 고난한 과정인지 잘 알고 있었다. 더욱이 미국의 달 착륙 계획인 아폴로 프로그램에서 Saturn-V 로켓의 F-1 엔진에 고주파 연소불안정이 발생하여 이를 해결하기 위해 1962년에서 1966년까지 30종 이상의 연소기 설계에 대해 2,000회 이상의 연소시험을 수행했다는 것 또한 잘 알려진 사실이기에 누리호 개발 연구진은 과연 언제 이 문제를 극복하고 앞으로 나갈 수 있을지 한 치 앞도 내다볼 수 없는 상황에 맞닥뜨렸다.

연구진은 해결할 수 있다는 자신감으로 심기일전하여 다시 개발에 임했지만 문제는 시간이었다. 75톤 연소기 제작에만 수개월이 걸리다 보니 제작-시험평가-결과분석-설계개선의 통상적인 과정으로는 도저히 개발 일정을 맞출 수 없었다. 연구진은 연소불안정 해결에 가장 효과적일 것으로 판단되는 핵심 설계 요소들을 선별하여 동일한 연소기에서 점진적으로 설계를 변경하고 연소시험을 통해 그 효과를 분석 평가함으로써 해결 방안을 도출하는 방식을 취했다. 이로써 매번 설계 변경된 연소기를 제작하는데 소요되는 시간을 획기적으로 절약할 수 있었다. 75톤 연소기에 대한 연소불안정 문제를 2014년 10월에 처음 인지한 이후 수회의

설계 변경 과정을 거쳐서 2016년 2월 최종 설계안을 손에 절 때까지 총 16개월이 소요되었다. 이로 인해 누리호 개발 일정에 지연이 발생되기는 했지만 미국 아폴로 프로그램의 F-1 엔진 경우와 비교하면 매우 빠르고 수월하게 해결한 것이었다고 할 수 있다.

개발 중에 닥친 난제는 이것뿐만이 아니었다. 발사체의 연료와 산화제를 담는 추진제 탱크도 초기에 제작 불량으로 개발에 어려움을 겪었다. 추진제 탱크는 발사체 기체 구조의 약 70~80%를 차지하여 탱크 중량이 발사체 성능과 직결되므로 경량화가 필수적이다. 1단 산화제 탱크는 최대 길이 10m, 최대 직경 3.5m인데 탱크 내부에 대기압의 4~6배 압력이 작용하는 가운데 비행중 가해지는 관성력과 공력 하중 등을 견딜 수 있어야 하며, 동시에 무게를 줄이기 위해 최소 두께 2mm로 제작해야 한다. 매우 얇은 두께의 대형 구조물을 용접으로 접합하기 위해서는 용접 변형을 최소화하여야 하는데 이러한 공정을 개발하는데 1년 가량이 소요되었다. 각고의 노력 끝에 2018년 2단 추진제 탱크, 2019년 3단 구형 추진제 탱크, 2020년 1단 추진제 탱크 개발이 완료되었다.

추진기관 개발 완료

누리호에는 약 37만 개의 부품이 들어가지만 그중에서 가장 개발 난도(難度)가 높은 부품은 액체로켓엔진이라 할 수 있다. 누리호 개발에서는 1단, 2단, 3단에 사용되는 각기 다른 엔진을 동시에 개발해야 해서 개발 부담도 매우 컸다.

누리호 75톤급 엔진은 2016년 5월 첫 1.5초 연소시험을 시작으로 7월에는 이 엔진의 임무 연소시간에 해당하는 145초 연소시험이 성공적으로 수행되었으며 그 이후에도 지속적인 시험을 실시하여 단일 시험으로 최대 260초까지 검증했다. 75톤급 엔진은 2단에 사용되는 고공 75톤급 엔진을 포함하여 총 33기의 엔진에 대해 시험 횟수 184회, 누적 18,290초의 연소시험을 실시했다. 7톤급 엔진은 총 12기의 엔진에 대해 시험 회수 93회, 누적 16,926초의 연소시험을 실시했다.

이후, 발사체를 구성하는 각 단(段)에 대한 최종 인증 절차로서 액체로켓엔진을 비롯하여 추진제 탱크, 배관, 각종 밸브 등을 조립하여 단별 최종성능을 검증하는 추진기관 종합연소시험도 성공적으로 완료했다. 추진기관 종합연소시험의 경우 2018년 7월에 2단, 2020년 3월에 3단을 완료했고, 2021년 3월에는 75톤급 엔진 4기가 클러스터링되어 총 추력 300톤의 성능을 제공하는 1단의 종합연소시험까지 성공적으로 완수함으로써 누리호의 각 단에 대한 인증을 완료했다. 추진기관 종합연소시험은 시험에 투입되는 하드웨어가 비행용에 준하여 구성된 하나의 로켓 단을 시험하는 것이어서 투입되는 인력, 장비의 규모나 시험의 복잡도 측



〈그림 1〉 누리호 75톤급 엔진 연소시험(사진 제공: 한국항공우주연구원)



〈그림 2〉 누리호 1단 인증 종합연소시험(사진 제공: 한국항공우주연구원)

면에서 엔진 연소시험과는 차원이 다르다. 특히 75톤 엔진 4기를 둑은 1단에 대한 종합연소 시험은 우리나라에서 최초로 시도하는 초대형 연소시험이었다. 총 3차에 걸쳐서 연소시간을 30초, 100초, 125초로 증가시키면서 시험을 수행했는데 특히 마지막 시험에는 당시 대통령인 문재인 대통령이 직접 나로우주센터를 방문하여 시험을 참관하였다. 영광스럽지만 극도의 긴장감 속에서 시험이 진행되었고 시험시간이 평소보다 더 길게 느껴졌지만, 다행히 시험은 성공적으로 종료되었다.

누리호 시험발사체 비행시험

누리호 개발사업 기획 시 75톤급 엔진에 대한 지상시험만으로는 성공적인 임무 달성을 보장할 수 없다는 지적에 따라 75톤급 엔진을 실제 비행시험을 통해 검증하기 위한 시험발사체를 개발 계획에 반영했다. 시험발사체는 3단형인 누리호의 2단과 3단을 이용하여 2단형 로켓으로 구성했다. 이를 위해 2단에 탑재되는 고공 75톤 엔진을 1단용 75톤 엔진으로 교체하고 시험발사체 기체(機體)에도 일부 필요한 변경을 적용했다. 비행궤적으로 본다면 시험발사체는 탑재체를 지구 궤도에 올리지는 못하고 타원형 궤적을 그리며 준궤도 비행을 하는 일종의 과학로켓에 해당한다. 시험발사체에 장착될 75톤 엔진은 2017년 12월 6일에 수락시험(受諾試驗)을 거친 후 시험발사체에 조립되었다. 액체추진 로켓인 누리호에는 추진제와 가스의 흐름을 단속하는 많은 밸브가 있는데 산화제로 사용되는 영하 183도의 극저온 액체산소나 초고압에서 작동하는 밸브에서 특별히 문제 발생 빈도가 높다. 이러한 이유로 시험발사체에서는 발사체 조립을 완료한 후 발사체를 발사대로 옮겨서 극저온 액체산소를 발사체에 실제로 충전했다가 배출하여 문제가 없는지 확인하는 과정을 진행하기로 했다. 이것을 Wet Dress Rehearsal(WDR)이라 부르는데 이 과정을 수행하면 추진제 배관이나 부품이 실제 추진제로 젖기 때문에 붙여진 이름이다.

시험발사체는 2018년 10월 25일이 발사일로 정해져 있었으나 WDR 수행 후 결과분석에서 산화제 탱크 내부의 헬륨 가압 계통에 미세 누설이 있는 것으로 판단되어 발사 일정을 연기하고 이를 수리한 후에 발사하기로 했다. WDR이 아니었더라면 시험발사체의 발사는 자칫 실패로 끝날 수 있었다. 2018년 11월 28일 오후 4시, 비행시험의 주 검증 대상인 75톤급 엔진이 점화되면서 시험발사체를 힘차게 비상시켰고 점화 후 151초, 비행고도 75km에서 엔진이 정상 종료되면서 75톤급 엔진의 비행 검증은 성공적으로 마무리되었다. 시험발사체는 75톤급 엔진 검증이 주목적이기는 했지만 이를 통해 누리호 2단 로켓 시스템 및 발사 추적시스템, 원격계측 시스템 등을 점검할 기회가 되어 누리호의 성공 가능성을 높이는 데도 기여했다.

누리호 1차 비행시험

대한민국에서 우주발사체를 발사하려면 우주개발진흥법에 따라 발사계획서를 제출하여 정부의 발사허가를 받아야 한다. 우주발사체 발사와 관련된 주요 의결은 과학기술정보통신부 1차관이 주관하는 발사관리위원회에서 이루어진다. 누리호 1차 발사에 대한 발사관리위원회에서 2021년 10월 21일 16시를 발사일시로 확정함에 따라 그 일정에 맞추어 발사 준비

가 시작되었다. 누리호 1차 비행시험에서는 실제 위성을 탑재하지 않고 1.5톤 위성의 무게를 모사하는 위성모사체를 탑재했다. 발사 이틀 전인 10월 19일 오후 5시 30분에 비행시험위원회를 개최하여 각 분야별 발사 준비사항을 확인하고 누리호의 발사대 이송을 결정했다. 이에 따라 발사 하루 전 이른 아침에 누리호는 조립동을 떠나 발사대로 이송되었고 발사대에 기립하여 전기 및 유공압 계통을 연결하는 작업이 수행되었다. 발사 당일인 10월 21일, 발사 참여자 모두가 긴장 속에서 이른 아침부터 일과를 시작했고, 오전 9시에 개최된 비행시험위원회에서 추진제 충전과 발사를 최종 승인함에 따라 당일 계획대로 발사 업무가 진행되었다. 이 날 오전에 진행된 발사 준비 점검은 비교적 순조롭게 진행되었으나 발사대 지하의 지상 공급 계통 밸브 오작동 문제로 지연이 발생하여 누리호 발사 시각은 오후 4시에서 오후 5시로 한 시간 연기되었다. 그 이후에는 순조롭게 발사 준비가 진행되었고 모든 준비 과정을 거쳐 누리호는 발사 10분을 남겨둔 오후 4시 50분부터 발사 자동 시퀀스에 들어갔다. 발사 자동 시퀀스는 사람이 판단하여 절차를 진행하지 않고 컴퓨터가 자동으로 정해진 시퀀스에 따라 정상상태를 판단하여 예정된 업무를 진행하는 과정을 의미한다. 발사 4초 전에 1단 엔진 4기를 점화하고 엔진 추력이 이륙에 필요한 수준에 도달했음을 확인한 후 발사대의 발사체 지상고 정장치 구속을 풀자 누리호는 서서히 이륙을 시작했다. 1단 연소종료-1단 분리-2단 점화-페어링 분리-2단 연소종료-2단 분리-3단 점화까지 모든 과정이 순조롭게 진행되었다. 그러나 3단 엔진이 예상 연소시간보다 46초 빨리 종료되었고 이 시점의 비행 속도는 6.5km/s로 위성 궤도 투입속도 7.5km/s에 도달하지 못했다. 그럼에도 불구하고 누리호는 예정대로 3단 엔진 종료 후 170초에 목표궤도에 도달하여 위성모사체를 정상적으로 분리했으나 궤도 투입속도에 이르지 못하여 궤도안착에 실패하고 약 45분 후에 호주 남부 공해상에 추락했다.

비록 최종 단계에서 실패는 했지만 국내 독자개발 발사체의 첫 비행시험을 통해 주요 발사 단계를 성공적으로 이행하고 발사체의 성능을 검증했다는 데 의의가 있다. 이날 발사행사를 참관한 문재인 대통령도 첫 번째 발사로 매우 훌륭한 성과를 내었다고 연구진을 격려했다.

누리호 1차 비행시험 조사위원회

누리호 1차 비행시험에서 기술적으로 소기의 성과가 있었고 전 국민이 호응하고 격려를 아끼지 않았지만 위성을 목표궤도에 투입하지 못했으므로 발사체 임무 측면에서는 분명한 실패였다. 실패 원인 분석을 위한 조사위원회가 정부 주도로 구성되었는데 전원(全員) 외부 전문가로 구성되었던 나로호 때와는 달리 조사위원의 과반을 항우연 내 누리호 개발 연구진으로 구성하고 항우연 부원장을 조사위원장으로 선임해 누리호 개발 참여자의 전문성을 인

정해 주었다. 원인 분석은 항우연 내 실무연구진들이 내부회의를 통해 조사 분석한 내용을 내부/외부 전문가로 구성된 조사위원회에서 발표하고 함께 논의하는 방식으로 진행되었다. 2021년 10월 말부터 약 2개월간 총 7차에 걸친 내부회의와 5차의 조사위원회 회의를 거쳐 비정상 비행의 원인을 밝혀내었다. 원인 조사 과정에서는 누리호 비행시험에서 취득한 2,600여 종의 원격계측 데이터와 5종의 영상자료가 철저히 분석되었다. 조사위원회는 조사 초기 단계에 3단 산화제 탱크의 압력 저하에 의해 엔진이 조기 종료되었음을 확인하고 그 구체적인 원인 규명에 초점을 맞추었다.

조사 결과 3단 산화제 탱크 내부에 추진제 탱크 가압에 사용되는 헬륨을 고압으로 저장하는 구형(球形) 탱크가 들어가 있는데 고압헬륨탱크 고정장치 설계 시 탱크에 작용하는 부력을 적절하게 반영하지 못한 것이 원인이었음이 밝혀졌다. 비행 가속도가 증가하면 그에 비례하여 헬륨 탱크에 작용하는 부력이 증가하는데 3단 비행 시의 최대 비행가속도를 제대로 반영하지 않은 것이었다. 비행 가속도 증가로 산화제 탱크 내부 바닥 면에 설치된 헬륨탱크에 설계하중 이상의 부력이 작용하여 고정장치가 풀리게 됨에 따라 헬륨탱크가 하부 고정부에서 이탈했다. 이탈한 헬륨탱크가 액체산소 내에서 상승하면서 탱크 배관을 변형시켜 헬륨이 누설되도록 했고 또한 산화제 탱크의 균열을 발생시켜 산화제가 탱크 외부로 누설되도록 했다. 이로 인해 3단 엔진으로 유입되는 산화제 양이 감소해 엔진이 조기에 종료되는 결과를 낳았다고 분석했다. 원인분석 결과에 따른 시정조치로 3단 산화제 탱크 내부의 고압헬륨탱크가 부력 하중에 의해 이탈하지 않도록 헬륨탱크 하부 고정부를 보강하고 부가적으로 산화제 탱크 맨홀 덮개의 두께를 강화하는 등의 기술적 조치를 실시하고 검증시험을 통해 유효성을 확인한 후 2차 발사를 준비했다.

누리호 2차 비행시험

2021년 12월 말에 1차 비행시험 실패에 대한 원인 규명을 완료하고 2차 발사에 필요한 조치를 시작했다. 2차 비행시험 날짜는 장마가 시작되는 6월 말 이전인 6월 15일로 결정했다. 위성모사체를 탑재물로 실었던 1차 발사 때와는 달리 2차 발사에서는 누리호의 궤도투입 능력을 검증하기 위한 성능검증위성이 탑재되었으며 위성 탑재체로는 국내에서 개발된 우주용 부품을 우주환경에서 검증하기 위해 탑재되었다. 또한 2019년 큐브위성 경연대회에서 입상한 조선대, 서울대, 연세대, KAIST의 큐브위성이 성능검증위성을 통해 우주공간에 투입되기 위해 위성 사출관에 탑재되었다.

누리호 2차 발사 예정일은 2022년 6월 15일로 결정되었으나 발사 하루 전날 기상분석 결



〈그림 3〉 누리호 2차 발사 장면(사진 제공: 한국항공우주연구원)

과 비와 강풍이 예상되어 발사체 기립 및 후속 작업 시 안전사고의 우려로 발사 일정을 6월 16일로 하루 연기했다. 변경된 일정에 따라 발사 하루 전에 발사체를 발사대로 이송하여 점검하던 중 1단 산화제 탱크의 충전 수위를 측정하는 센서 신호의 이상이 발견되었다. 문제 해결을 위해 발사 운용을 중지하고 누리호를 조립동으로 회수하여 점검을 실시했으며, 문제가 발생한 부품을 교체하고 발사 예비기간인 6월 23일 내에 발사가 가능한 것으로 판단되어 기상예보 등을 고려하여 발사일을 6월 21일로 다시 정했다. 6월 20일 발사대로 이송된 누리호는 모든 점검과정을 이상 없이 완료했고 발사 당일에도 발사 절차가 정상적으로 진행되어 예정 시각인 오후 4시에 발사되었다. 모든 발사과정을 완료한 후 오후 4시 14분 35초에 성능 검증위성을 성공적으로 분리하여 고도 700km의 목표궤도에 안착시켰다. 이후 위성 교신까지 성공적으로 수행됨에 따라 우리나라에는 마침내 자력으로 우주발사체를 개발하고 운용하는 기술을 확보했다.

누리호 개발 의의

누리호 2차 발사 성공으로 우주강국을 향한 12년간의 도전은 마침내 성공으로 매듭지어졌다. 누리호 독자개발을 통해 우주발사체 설계, 제작, 시험평가, 발사운용 기술을 확보했고, 우



〈그림 4〉 발사대에서의 누리호와 2차 발사 시 이륙 장면(사진 제공: 한국항공우주연구원)

리 위성을 우리 발사체로 발사할 수 있는 독자적인 우주 수송 능력을 확보하여 자주적인 우주개발 역량을 갖게 되었다.

발사체 기술은 한 나라의 국력과 총체적인 과학 기술력을 상징하며, 발사체 기술에 대한 자주권 확보는 지속 가능한 우주개발의 추진 및 국가 안보 역량 강화에 매우 중요한 요소다.

산업적 측면에서 누리호 개발에 300여 개 국내기업이 참가했고, 독자개발에 필요한 핵심 부품 개발에는 30여 개 기업에서 500여 명의 인력이 투입되었다. 누리호 개발비의 80%에 해당하는 약 1조 5,000억 원의 예산이 국내 산업체로 집행되어 국내 우주산업 기술 및 인력을 확보하게 됨으로써 우주산업 생태계를 조성했다는 데 의의가 있다.

누리호 개발 성공으로 대한민국은 새로운 도전을 준비할 수 있게 되었다. 우선 한국형발사체고도화사업(2022~2027, 총예산 6,874억)으로 누리호 반복발사를 통한 신뢰성 향상과 이를 통한 우주수송능력 확보, 그리고 발사체 체계종합기업을 발굴하여 육성한다. 이 사업에서는 발사체 체계종합기업이 누리호를 제작하여 총 4회 발사를 실시하며 실제 위성을 탑재한다. 또한, 차세대발사체개발사업(2023~2032, 총예산 2조 132억 원)에서는 저궤도 대형위성 및 정지궤도 위성 발사, 그리고 2032년 달착륙선 발사를 통한 우주탐사 등 국가우주개발 수요에 대응하고 자주적 우주탐사 역량 확보를 위한 차세대발사체를 개발한다. 차세대발사체는 2단형으로서 누리호보다 기술적으로 더 진보된 다단연소(多段燃燒) 사이클론 엔진을 추진기관으

로 사용하여 누리호 대비 약 3배 증가된 우주수송능력을 가지며 누리호로는 임무가 불가능했던 화성 탐사도 가능하며 화성 전이궤도에 1톤의 탐사선을 보낼 수 있다. 또한 차세대발사체에 3단을 추가하거나 고체로켓 부스터를 장착하면 임무 범위와 능력을 더욱 확장할 수 있다. 누리호는 대한민국의 최초의 우주수송체로서 우주로 가는 문을 열었으며 누리호 후속 사업을 통해 우주는 더 이상 우리에게 동경의 대상이 아닌 생활의 영역이 될 것으로 기대된다.

이 글을 준비하는 데 항공우주연구원 발사체연구소장 최환석 박사가 유익한 데이터를 제공해 주셨다. 이에 감사를 표한다.