

NASA의 발사체 수명주기에 대한 연구

정동호* · 김지훈 · 이한주 · 오승협

A Study on the Life Cycle for Launch Vehicle in NASA

Dongho Jung* · Jihoon Kim · Hanju Lee · Seunghyub Oh

ABSTRACT

A Launch vehicle which consists of many sub-systems is one sophisticated huge system. A lot of experience and system integration technique are needed for the launch vehicle to accomplish a mission successfully. The characteristics and complexity in the development of the launch vehicle depend on the size of that. However the systematic work flow is similar to each other. This paper introduces a standardized development process which is based on the whole program life cycles and experiences of NASA on the development of the launch vehicle. The development process can be categorized into 10 phases through the life cycle of the launch vehicle.

초 록

발사체는 수많은 서브시스템들로 구성된 복잡한 하나의 대형 시스템이다. 이런 시스템 하나하나를 개발하고, 통합해서 임무를 수행하는 데는 많은 경험과 통합기술이 필요하다. 이런 기술과 경험은 한 순간에 얻어지는 것이 아니지만 선진 사례를 통해서 개발절차를 연구해보았다. 발사체 시스템의 크기에 따라서 업무의 성격과 복잡성은 달라질 수 있으나 체계화 된 업무 절차는 동일 할 것으로 판단된다. 여기에 소개한 발사체의 개발과정은 나사에서 수많은 발사체를 개발하면서 경험한 절차를 토대로 프로그램의 수명주기를 통해서 어느 정도 표준화된 것이다. 이 개발단계는 발사체의 수명주기를 통해서 10단계로 구성되었다.

Key Words: Launch Vehicle Life Cycle(발사체 수명 주기), Launch Vehicle Development Process(발사체 개발 과정)

1. 서 론

발사체의 개발역사를 돌이켜보면 냉전시대에
는 미국과 소련 양국이 경쟁적으로 발사체개발

에 참여하면서 규모적인 성장을 해왔고, 근래에
는 유럽연합과 같이 새로이 발사체 개발에 참여
한 나라 또는 기업의 활약이 돋보이는 가운데
지금은 그간의 기술력을 바탕으로 발사체 선진
국들은 보다 저렴하고, 보다 에너지 효율적이고,
보다 시스템 효율이 높은 이상적인 시스템을 개
발하기위해서 노력하고 있다. 좋은 예로 재사용

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

이 가능한 스페이스 셔틀을 들 수 있다.

발사체의 개발은 아주 복잡하고, 비용이 많이 들고, 높은 불확실성이 항상 존재함에 따라 위험에 노출된 프로그램이다. 이런 발사체 개발 프로그램이 잘 수행되기 위해서는 서로 다른 서브시스템, 부품들과의 조화가 필요한데, 이러한 조화는 이른바 반복수행이라 불리는 방법에 의해 최적화된다. 이러한 반복수행기법은 설계 단계뿐만 아니라 초기에 요구사항을 정리하는 일에도, 통합하는 과정에서도, 시스템을 운용하는 일에도 포괄적으로 사용된다. 반복기법은 분석, 시뮬레이션, 시험 결과, 엔지니어링 판단력 등에 근거하여 가지치기 하듯 하나하나의 요구조건이나 문제점들을 정리하면서 절충해가는 과정이다. 이러한 과정 속에서 의사소통이 자연스럽게 활성화된다고 할 수 있겠다. 반복기법은 앞으로 자주 다루어지게 되는데 반복기법이 중요하게 여겨지는 이유는 앞서 언급한 것처럼 의사소통에 영향이 있기 때문인데, 반복과정을 통해서 서로 다른 서브시스템 및 부품들과 물리적, 기능적 인터페이스를 확인하게 되는 과정이 유발되고, 이를 통해서 하나하나의 요구사항을 절충하기 위해서 의사소통기술이 절대적으로 필요하게 된다.

지금부터 소개되는 과정을 참고해서 어떤 방식의 업무가 반복과정을 거치면서 정형화 되는지 파악할 수 있는 계기가 되었으면 한다. 개발 단계는 크게 10단계로 구분된다.

2. NASA의 발사체 수명주기

우리나라는 발사체 분야에서 선진국들에 비해 출발이 늦은 만큼 선진국의 기술을 빨리 따라잡기 위해서는 선진국들이 개발해온 경험을 사례 연구 등을 통해서 미리확인해볼 필요가 있겠다. 하지만 대부분의 발사체 자료가 그렇듯 대부분 공개되지 않아서 사례연구를 하는 것이 쉬운 일은 아니다. 그런 관점에서 이번에 소개되는 NASA의 발사체 개발과정은 상세한 기술적인 사항을 깊이 다루기보다는 전체적인 개발과정을 포괄적으로 다루어서 체계적인 업무흐름을 파악

하는데 도움이 된다. 발사체 개발과정을 전체 수명주기로 보고 10단계로 구분하였는데, 각 단계마다 어떤 업무들이 진행되는지, 무엇이 산출물이 되는지, 단계별로 연관관계는 어떻게 되는지 등을 파악할 수 있다.

2.1 임무 실현 가능성 확인

임무실현 가능성을 확인하는 단계는 예비단계 또는 선행연구단계라고도 할 수 있다. 어떤 개발 요구가 있게 되면 기술적 관리로 개발에 대한 연구계획과 후속계획이 필요하게 되고, 기술적 제품은 임무목표와 목적, 개념/설계 평가원칙, 임무개념, 운용개념, 수명주기 비용전적, 가능성 부과와 같은 산출물이 필요하다.

구체적으로 임무실현 가능성 확인 단계는 임무 목적과 상위레벨의 기능적, 물리적 요구사항에 대한 정의가 이루어지고, 임무 기술과 프로그램 실현 가능성을 확실히 하고, 고객의 임무 요구를 확인한다.

임무 실현 가능성을 확인하는 단계의 업무들은 10가지 정도로 분류되는데 처음부터 마지막 단계까지 흘러간 후에 반복과정을 거치면서 요구사항이 다듬어 지고, 좀더 현실적인 계획이 만들어 지는 것을 알 수 있다.

이런 반복과정을 거쳐 만들어진 고객의 요구사항은 Mission Concept Review(MCR)를 통해 최종 확인되고, 다음 단계로의 진행여부 승인을 거치게 된다.

2.2 임무 정의

1단계를 거치면서 정리된 고객의 요구사항을 토대로 시스템에 대한 요구사항을 정리하는 단계가 2단계 임무정의 단계이다. 2단계에서는 관리자와 감사, 재무부서의 장으로 구성된 위원회로부터 MNS(Mission Need Statement) 승인이 필요하고, 프로그램의 관리자 연합 위원회는 예비 IPS(Integrated Program/Project Summary)와 예비 프로그램 계획을 작성하게 된다. 프로그램 매니저는 이 단계에서 위험관리계획과 MNS를 작성한다. 프로젝트 매니저는 과제 정의 계획을 작성하고, 3단계부터 8단계까지(설계, 제작, 운

용)의 RFP(Request For Proposal)를 작성한다.

이 단계에서의 중요한 검토는 MDR(Mission Definition Review)이고, 고객이 요구한 임무에 대한 정의와 그 정의에 대한 검토가 이루어진다. 또한 기술 관리에 따른 산출물은 시스템 엔지니어링 관리 계획과 정보관리 계획, 엔지니어링 마스터 플랜/마스터 스케줄, 위험관리 계획이다. 이를 토대로 작성된 기술적 산출물은 임무 요구 설명, 기능적 임무 개념, 예비 시스템 명세, 과학적 요구사항, 분석결과, 기술 개발 계획 등이다. 이상의 내용에서 볼 수 있듯이 2단계에서는 1단계의 임무실현 가능성에 대한 추진계획을 작성하고, 작성된 계획이 임무실현 가능성과 부합하는지 반복하는 과정이다. Fig. 1의 임무정의에서 표현한 것처럼 2단계에서는 임무 요구사항을 분석하여 임무개념과 운용 개념을 정리하고, 임무 요구사항이 잘 정의되었는지 확인하는 검토를 한다. 여기서 정리된 요구사항은 시스템 단위의 요구사항으로 정의되어 구체적인 수준까지 요구사항을 개발하고, 서브시스템 및 부품단위의 요구사항으로 확대하여 개발하는 것이다. 이런 과정을 거치면서 고객의 임무에 대한 요구사항은 시스템 개발 요구사항으로 발전되는 것이다.

23 시스템 정의

3단계는 2단계에서 정의된 시스템 개발 요구사항을 실제 개발에 필요한 요구사항으로 다듬는 작업이 이루어지는데, 이 단계의 마지막 부분에는 관리자와 감사, 재무부서의 장으로 구성된 위원회가 PCA(Program Commitment Agreement)라 불리는 프로그램 이행 협정을 승인하게 된다. 프로그램 관리자 연합 위원회는 PCA를 작성하여 앞서 언급한 관리자와 감사, 재무부서의 장으로 구성된 위원회에 승인을 요청하는 것이다. 또한, 프로그램 관리자 연합위원회는 최종 프로그램계획을 작성한다. 이를 위해 프로그램 관리자는 통합 프로그램의 마스터 스케줄을 작성하고, 예비 과제 계획을 작성하게 된다. 프로그램 관리자 하위의 프로젝트 관리자는 담당하는 시스템의 개발 계획을 작성하는 것이 관리자 레벨의 업무 흐름이다.

이 단계의 기술 관리 산출물은 프로그램/프로젝트 관리 계획과 개발 계획, 업무 범위 정의, 시스템 안전 계획, 형상관리 계획, 문서구조를 결정짓는다. 기술적 산출물은 시스템의 개념과 구성이 결정지어지고, 구체적인 시스템의 명세서가 작성되며, 인터페이스 요구사항이 정리된다. 그 외에도 환경에 대한 명세서와 유인 우주선인 관계로 인간 시스템 표준이란 항목도 추가되며, 개념 및 설계의 평가원칙도 작성되고, 개발시험의 범위도 다루어지고, 개발에 사용될 공학단위의 결정, 하드웨어/소프트웨어의 목록, 개발에 내재되어있는 위험을 분석하고, 개발시험의 결과들과 기술개발의 요구사항들이 정리된다.

시스템 정의 단계를 통해서 얻고자 하는 기술적 최종 목표는 간단히 요약하면 6가지로 첫째, 시스템이 제한된 비용과 일정에서 성능을 만족하는지를 증명하는 것이다. 둘째, 최종항목의 요구사항 설정내용을 확인함으로써 완벽한 기능적 베이스라인이 생성되는 것이다. 셋째, 중요기술과 개발에 오랜 기간이 소요되는 장기적 항목에 대한 기술적 위험 완화가 이루어진다. 넷째, 기술적 자원과 프로그램의 확실한 견적이 가능하다. 다섯째, 어떤 위험이 있는 지 파악하여 프로그램의 불확실한 위험을 완화할 수 있다. 여섯째, 설계 레벨의 구성이 완성된다.

2단계에서 정의된 시스템 요구사항이 3단계를 거치면서 하위시스템의 요구사항으로 더 정교하게 다듬어 지는 것이고, 이렇게 정리된 요구사항은 제한된 비용과 기술적 수준에서 달성가능한 수준인지 분석하고 평가하는 단계이다. 3단계에서 정리된 요구사항은 SRR(System Requirement Review)를 통해서 확정되고, 향후 지속적으로 관리되어 갱신, 유지된다. 이런 정리된 요구사항을 바탕으로 시스템의 올바른 개념이 잡혀서 시스템 설계가 수행되는 것이고, 3단계의 마지막 단계인 SDR(System Design Review)이 수행된다. 시스템 설계에서는 어떤 시스템을 개발하겠다는 정의가 필요하고, 이는 경영자의 판단/승인이 필요한 사항이다.

24 예비 설계

예비 설계 단계에서는 시스템설계에서 정의된 시스템의 개념에 좀 더 상세한 기술적인 사항을 추가하는 단계로, 관리자과 감사 및 재무부서의 장으로 구성된 위원회는 예비 설계결과에 대한 MNS를 재승인하게 된다. 앞서 2단계에서 승인된 MNS를 재승인하는 이유는 시스템 설계와 예비 설계과정을 거치면서 임무정의 단계에서 승인한 MNS가 변경될 수 있기 때문으로 예측된다. 예비 설계 단계의 기술 관리 산출물은 WBS(Work Breakdown Structure)와 기술적인 성능관리 계획과 오염 제어 계획, 파트들에 대한 제어 계획, 환경 제어 계획, 통합 지원 프로그램 계획, EMI/EMC 제어 계획, 제품/생산성 프로그램 계획, 신뢰성 프로그램 계획, 품질 보증 계획, 적용 가능한 표준이다. 기술적 산출물은 설계 명세서와 H/W와 S/W 명세서, 폐기 요구사항, 명세서 트리, 도면 트리/엔지니어링 도면 목록, 인터페이스 조정문서, 탑재물 운송 통합 계획, 인증 계획, 인증 요구사항 매트릭스, 환경 영향 설명이다. 예비 설계단계는 임무 요구에 완전히 부합하는 설계 해법을 설정하고, 시험과 검증 계획의 완성과 설계에 영향을 받는 요구사항과 인터페이스를 설정하고 실제 설계를 수행하는 단계이다. 부품단위의 상세한 요구사항으로부터 시작해서 실제 제품으로 구현하기 위해서 기술적인 검토가 이루어지고, 설계 결과에 대한 검증과 평가가 이루어진다.

예비 설계 검토가 이루어지기 전 프로그램 관리자는 계약자를 선정하고, PDR결과에 따른 베이스 라인을 확정 짓는다. 프로젝트 관리자는 세부적인 과제 계획을 작성하게 된다. 앞서와 마찬가지로 예비 설계 검토가 이루어지면서 다음단계로 계속 진행해도 될지의 판단은 경영자가 해야 한다.

25 최종 설계

최종 설계 단계는 설계 단계의 마지막으로 구체적인 설계안이 도출되는 시기이다. 우선 기술 관리 산출물로는 설계 후 제작을 위한 생산계획과 기술적인 성능을 측정할 보고서와 재료와 공정의 제어 계획, 통합된 체계 지원계획이다. 관

련하여 기술적 산출물은 구체적으로 무엇을 제작하겠다는 제작명세서와 제작과정상의 설계자 요구사항, 설계 결과물 및 설계 발표, 운용한도의 설정과 제한방법, 통합된 개략도, 스페어 공급 목록, 인증 대상 및 항목, 발사 운용 계획, 운용 계획이 변화된 내용, 폐기 계획, 수락 계획, 수락 원칙, 검증 요구사항과 명세서, 검증 절차, 통합 및 조립 계획이다. 최종 설계는 설계를 검증하여 완벽한 설정을 하기위한 것이고, 모든 설계 특성의 설정과 제작 과정과 조건을 설정하고, 인터페이스 요소의 통합과 최종적인 인터페이스 확인을 하는 단계이다.

최종 설계단계에서는 다시 CDR(Critical Design Review)시점의 베이스라인을 결정하게 되고, CDR의 수행 및 프로그램/프로젝트 관리자들과 함께 분기별 점검을 한다. 이 단계는 본격적인 제작전의 점검이라는 의미에서 중요한 시점이라고 할 수 있으며, 모든 설계가 확정되고, 제작 확인 및 인증을 어떻게 할지 결정짓게 된다.

26 제작과 통합

제작단계인 6단계의 기술 관리 산출물로는 운용계획이 있고, 기술적 산출물은 운용절차와 훈련계획, 사용자 매뉴얼, 비행중의 점검 계획, 컴퓨터 자원의 통합된 지원 문서, 검증 데이터가 있다. 이 단계에서는 생산제품의 명세서와 수락 원칙 확인과 시스템 조립 및 통합, 시스템 확인과 검증, 임무 수행을 위한 시스템 이용 능력 개발, 생산/관리와 운용을 위한 설비 준비가 필요하다. 이 단계에서도 최종설계 개념과 제작되는 개념과의 반복적인 비교분석을 통해서 시스템의 조립 및 시험, 검증을 확인해야 한다. 관련하여 시스템의 수락계획에 근거하여 시스템의 수락시험을 수행하고, 납품준비를 마치게 된다.

27 배치를 위한 준비

7단계인 배치를 위한 준비 단계는 제작된 H/W와 S/W의 납품으로 시작되는 단계이다. 이 단계부터 발사운용이 시작되는데, 납품된 H/W 및 S/W를 잘 구성해서 또 하나의 시스템으로

만든다. 이렇게 만들어진 시스템은 발사체와 페이로드 지상지원설비와 관제설비를 넓게는 위성 운용설비를 포함하는 개념이다. 발사와 관련된 전체시스템의 구성이 완성되면 발사운용을 위한 필요인원들에 대한 수요를 파악하여 필요한 교육을 마친 상태까지를 이 단계에서 수행하게 된다. 이렇게 시스템을 구성하고, 필요인력에 대한 준비과정 외에도 시스템차원의 발사조건을 확립하고, Go/No-go 원칙을 세우게 된다. 모든 준비 작업이 완료되는 시점에는 발사 준비 보고서와 시스템 구성 중 발생되었던 사건 보고서, 문제/실패 보고서가 완성된다. 이 단계의 마지막으로 FRR(Flight Readiness Review)를 수행한다.

28 배치와 운용 검증

시스템이 배치를 위한 준비가 전 단계에서 마무리 되었으므로 이 단계에서는 실제 배치하는 작업이 남아있다. 기술적인 산출물은 운용환경 결과와 시스템을 배치하고 운용하는데 문제가 될 수 있는 문제/실패보고서가 준비되어야 하고, 시스템 운용에 필요한 기술적 매뉴얼과 데이터가 필요하다. 또, 중요한 것은 운용능력을 갖춘 인력의 준비이다.

이 단계에는 시스템 운용에 대한 가이드라인이 제시되어야 하고, 시스템의 상세한 운용계획을 다시 한번 확인해야 한다. 여기에서는 운용인력과 시스템간의 리허설 등을 통해서 수립된 시나리오상의 문제점을 파악해서 수정하는 작업이 반드시 수행되어야 하고, 이런 준비들이 모여서 앞서 언급한 문제/실패보고서로 정리가 되어야 한다. 관련된 모든 점검이 마무리되면 시스템의 운용준비검토회의인 ORR(Operation Readiness Review)를 통해서 최종 운용준비 상태를 검토하게 된다.

29 임무 운용

이 단계는 실제 발사를 운용하는 단계로 정의된 절차와 가이드라인 범위 안에서 시스템을 운용하는 분야이다. 시스템을 운용한다는 의미는 발사체가 Lift-off 되는 것을 확인하고, 계획된 이벤트들이 계획대로 이행되는지 확인하는 과정을

의미하는 것이다. 시스템이 운용되고 나면 실제 운용상의 문제점을 다시 파악해서 시스템의 개선사항을 정리하여 관련분야에 피드백 되도록 해야 한다. 준비된 모든 업무가 종료될 시점에 그동안의 경험을 바탕으로 Lessons & Learned를 정리해야하고, 실제 시스템의 운용이 끝난 것이므로 시스템의 휴업을 검토하기 위한 DR(Decommissioning Review)를 수행한다.

210 폐기

이 단계는 시스템 수명주기의 마지막 단계로 모든 시스템의 계획된 운용이 끝나고 공식적인 폐기 또는 휴업을 하기 위한 단계이다. 폐기 단계를 통해서 폐기 항목, 재활용 항목, 휴업 항목, 폐기물로 구분되어 시스템의 수명이 다하게 되는 것이다.

211 통합된 전체 개발 과정

지금까지 10단계로 구분해서 알아본 NASA의 발사체 개발과정을 Fig. 1에 통합하여 나타내었다. 이 그림은 한눈에 개발과정이 어떻게 흘러가는지 파악 할 수 있도록 만든 것이다.

3. 결 론

발사체의 개발프로그램은 많은 비용과 시간, 인력이 투입되는 대단히 복잡할 뿐만 아니라, 불확실성 속에서 잠재적인 위험에 노출되어있는 어려운 일임에는 틀림없다. 이런 어려운 일임에도 세계 각국에서 발사체의 개발 및 나아가서 우주개발에 막대한 예산과 시간을 투자하는 이유는 우주기술은 곧 국가의 국력일뿐더러 우주개발에서 조금이라도 다른 나라보다 우위를 차지하기 위함일 것이다.

우리나라의 발사체역사는 그리 길지 않기 때문에 다른 나라의 기술을 빨리 따라잡아야 하는데, 국가적으로 중요한 기술이기 때문에 기술이 전도 쉽지는 않은 상황이다. 이런 현실 속에서 NASA의 시스템 엔지니어링기법에 기반한 발사체 개발과정을 연구해 보았다. 발사체는 어느 한

부분이 중요한 것이 아니라 모든 시스템이 정해진 위치에서 정해진 능력을 발휘해야만 모든 시스템이 운용되는 종합시스템업무이다. 따라서 고객의 요구사항을 철저히 파악하여 불필요한 부분에 시간을 낭비하지 않고 정말 필요한 부분에 정렬을 쏟는 지혜가 필요하며, 시스템간의 인터페이스를 식별하고, 다른 시스템과의 조화를 어떻게 이루어내느냐가 중요한 부분이라 하겠다. 지금 언급한 부분들은 모두 전체 발사체 개발과정의 초기1단계부터 3단계정도의 업무범위이다. 이 부분이 중요하다고 강조 하는 이유는 시스템 엔지니어링 측면에서 보면 시스템의 전체 방향을 결정짓는 초기에 많은 노력이 필요하기 때문이다. 시작할 때 고객이 원하는 요구사항을 제대로 인식하지 못하고 설계결과나 제품을 빨리 산출하기위해서 앞서 언급한 부분을 생략하고 지

나간다면 분명히 그런 프로그램이나 프로젝트는 실패를 경험할 것이다.

고객의 요구사항을 바탕으로 시스템의 개념을 잡고, 이런 개념자체가 고객의 요구사항에 일치하는지 반복적으로 확인하는 작업이 필요한데, 이런 작업은 프로그램/프로젝트 구성원간 및 고객과 기타 이해관계자들과의 효과적인 의사소통을 통해서 가능하다.

참 고 문 헌

1. Robert Shishko, Ph.D., "NASA System Engineering Handbook," NASA-SP-6105, 1995

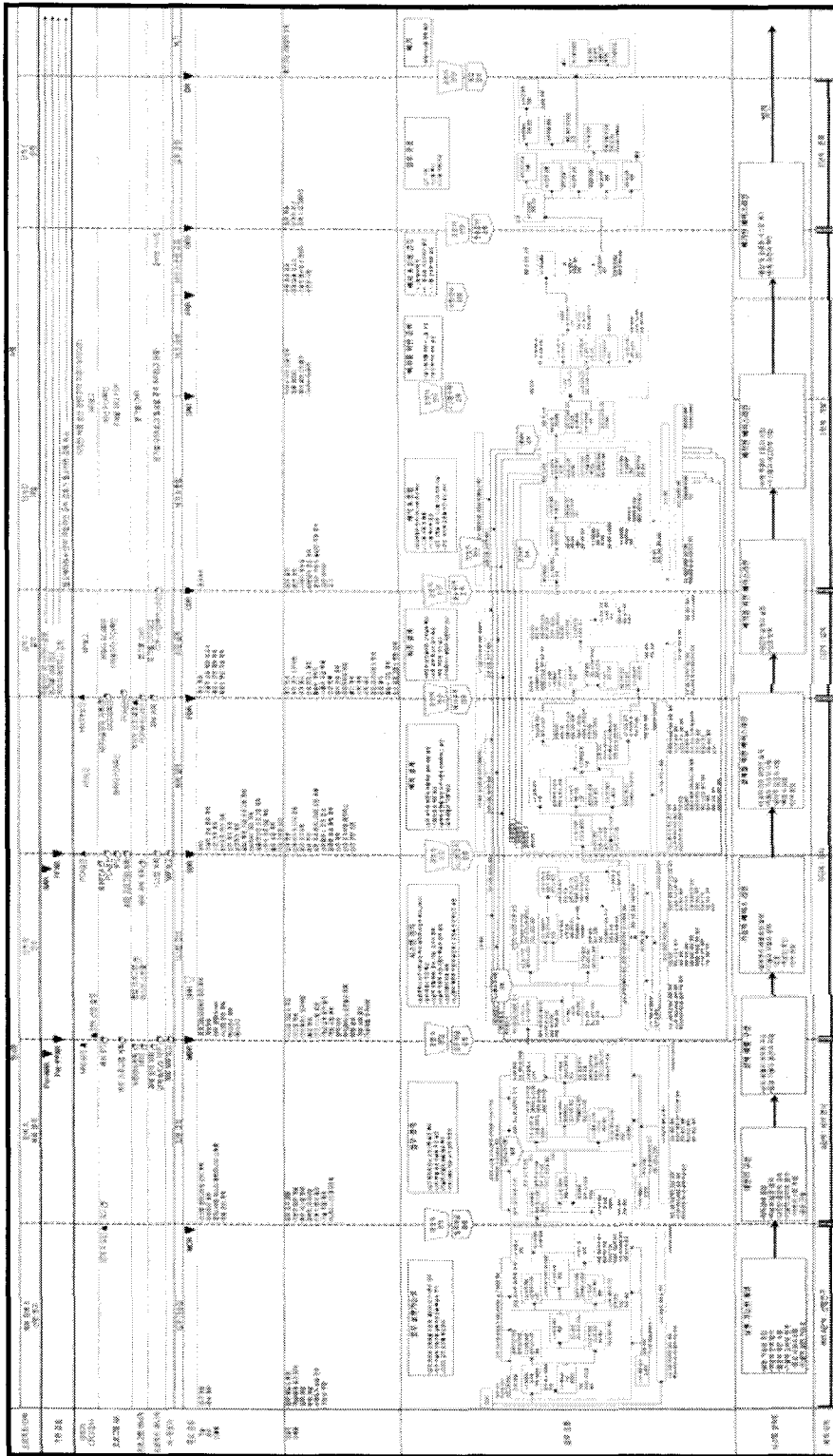


Fig 1 Integrated Life Cycle of the Launch Vehicle