

우주 발사 시스템 개발에 있어서의 SE 관리기법 적용

조미옥*, 조병규**, 오범석***, 박정주****, 조광래***** (한국항공우주연구원)

Application of SE Management Techniques for Space Launch System Development

Miok Joh*, Byoung-Gyu Cho**, Bum-Seok Oh***, Jeong-Joo Park****, Gwang-Rae Cho*****

ABSTRACT

System engineering(SE) management techniques applied for space launch system development are introduced to assess the current status and address the effectiveness of these techniques. Management plans and guides are prepared for the work breakdown structure, data, configuration, interface control, quality assurance, procurement, reliability, risk and verification/validation. Further improvement is required for the system engineering management plan(SEMP) to merge the international cooperation into current engineering management system.

Key Words : System Engineering Management Techniques, Space Launch System, SEMP

1. 서론

복잡한 시스템의 개발과정에 있어서 매우 유용하게 적용되는 다양한 시스템 엔지니어링 관리기법^{1,3} 중 우주 발사 시스템 개발에 실제 적용 중인 기법들을 중심으로 그 적용 현황을 개괄적으로 소개하였다. 한국항공우주연구원에서는 우주 발사 시스템 개발에 대한 시스템 엔지니어링 관리계획(SEMP)의 핵심 구성 요소인 통합 기술관리 영역에 필수적으로 적용하여야 하는 기법들을 추출하여 우선 적용함으로써 실용적인 개발체계 구축 및 운용을 도모하고 있다. 향후 조직 역량 및 시스템 성숙도를 고려하여 시스템 엔지니어링 관리 영역을 점차 확대해 나갈 계획이다.

2. 시스템 엔지니어링 관리

시스템 엔지니어링 관리 영역은 크게 기술 프로그램 계획, 위험 관리 및 프로그램 관리 영역으로 구분할 수 있다. 기술 프로그램 계획 영역에서는 작업분류체계(WBS : Work Breakdown Structure)를 구성하고 발사체 시스템 개발 계획을 수립하게 된다. 발사체 시스템 개발 계획은 IPT(Integrated Product/Process Team) 및

WG(Working Group)별 활동 정의를 포함한 조직 운영, 제작성, 시험성, 지원 및 조달, 특수 엔지니어링(Engineering Specialty) 등을 종합적으로 고려하여 수립한다. 위험 관리 영역에서는 기술, 일정 및 비용상의 위험을 식별하고, 식별된 위험에 대한 추적 및 경감 계획을 수립하고 시행한다. 프로그램 관리 영역에서는 자료 관리 및 형상 관리를 통한 설계 관리, 인터페이스 관리, 기술 기준(Technical Baseline)의 설정, 추적 및 갱신, 개발단계별 기술검토 회의를 통한 성과 기반 진척도 관리 등을 수행하게 된다.

시스템 엔지니어링 관리기법을 적용하여 우주 발사 시스템 개발을 효율적으로 추진하고자 기술관리 통합화 계획을 수립하였다. 기술관리 통합화 계획은 시스템 엔지니어링 관리계획 중 핵심적인 기술관리 영역을 우선 선정하여 적용한 것으로, 작업분류체계, 자료 및 형상관리, 인터페이스 관리, 품질보증 관리, 조달관리, 신뢰성 관리, 위험관리, 검증관리 등을 주요 내용으로 한다. 또한 기술관리 통합화 계획을 통하여 구체화된 시스템 엔지니어링 관리 기법을 보다 효과적으로 적용하고 의사소통 및 정보 전달 효율성 제고할 수 있는 통합 사업관리(PLM : Program Life-Cycle Management) 시스템을 구축, 운용하고 있다^{4,6}.

2.1 작업분류체계

작업분류체계는 우주 발사 시스템 개발을 위하여 필요한 작업을 계층적 구조로 분할 및 분류한 것으로, 기본 구조는 제품 기반(product-based)으로 구성되어 있다^{7,8}. 작업분류체계는 다음에 나타낸 활동들을 수행함에 있어서 매우 유용한 기준을 제공한다.

- 우주 발사 시스템 개발에 대한 기술 계획 및 일정 수립
- 비용 예측 및 예산 수립
- 작업명세서(SOW : Statement of Work)상의 업무 범위 정의
- 일정/비용/성과 등의 사업 현황 보고

또한 작업분류체계는 우주 발사 시스템 개발에 필요한 작업 항목을 일관되고 가시적인 기준으로 통합 관리할 수 있도록 하는 도구 및 개발 자료 식별 체계를 구성하는 기본 틀으로써, PLM 시스템의 근간을 이루는 주요 구성 요소 중 하나로 활용 중이다.

현재 구성된 WBS는 미 공군의 우주시스템 WBS⁹와 사업단에서 자체 구성한 제품분류체계(PBS : Product Breakdown Structure)를 기본으로 하여 구성되었다. 기존의 WBS는 작업항목의 식별번호, 작업이름, 담당부서, 담당자 등으로만 구성되어 있었으나, 최근 각 작업항목별 정의 및 타 항목과의 연계성 등 종합적인 사항이 정리된 WBS 사전을 추가하는 작업을 수행 중이다.

2.2 자료관리

자료관리 영역에서는 우주 발사 시스템 개발 과정에서 도출, 획득되는 모든 형태의 자료에 대하여 식별, 작성, 승인, 배포, 열람, 폐기, 보존 등을 포함한 관리 업무를 수행함으로써 원활한 의사소통 및 정보공유체계를 구축/유지하는 활동을 수행한다. 현재 우주 발사 시스템 개발 자료의 무결성 검토, 배포, 열람/폐기 처리, 자료작성 서식 제공 및 자료 보존 등의 활동은 자료관리실(DMO : Data Management Office)을 통하여 이루어지며, 우주 발사 시스템 개발에 참여하는 모든 구성원은 PLM 시스템을 통하여 등록된 개발 자료를 열람할 수 있다. PLM 시스템에는 자료-형상항목 간 연결 및 자료-자료 간 연결 정보 제공, 온라인 검토/승인/등록/개정, 변경관리, 텍스트 검색을 포함한 자료검색 등의 기능이 구현되어 입체적이고 효율적인 개발정보 접근 및 관리가 가능하다^{5,6}.

우주 발사 시스템 개발자료의 분류 및 식별체계는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 기술자료는 형상항목과 관련된 형상기술자료와 기타기술자료로 구분되며, 일반자료는 작성 주체에 따라 내부자료와 외부자료로 구분된다. 또한 다양한 자료식별접두사(DT)를 적용하여 자료 ID만으로도 해당 자료의 유형을 파악할 수 있으며, 형상기술자료는 WBS 코드(XXXXX, XYZZZ 등) 및 프로그램-호기(program-effectivity) 정보(P-E)를, 기타기술자료 및 일반자료는 작성부서 코드(DEPT)를 각각 적용하여 식별한다.

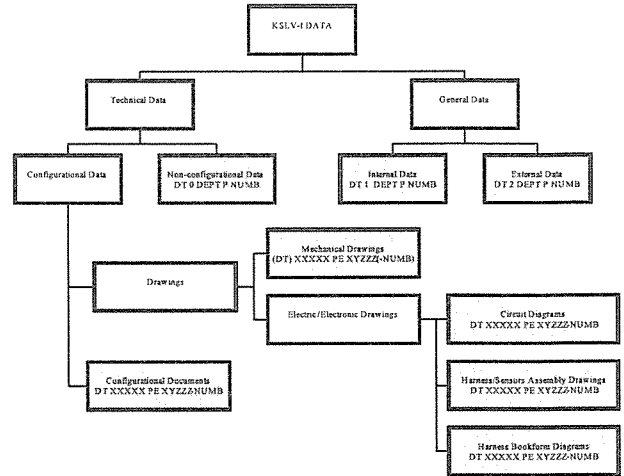


Fig. 1 Data Classification and Identification Structure

2.3 형상관리

형상관리 영역은 형상식별, 형상통제, 형상현황유지, 형상확인의 네가지 기본적인 활동으로 구성되어 있으며, 우주 발사 시스템 개발에 참여하는 모든 개발조직에서 작성/제작된 하드웨어, 소프트웨어, 인터페이스 및 관련 문서들을 관리 대상으로 한다⁹.

형상식별 과정에서는 설계/개발/시험/제작시 승인된 제품의 형상 및 관련 변경을 식별할 수 있도록 문서화하는 활동을 수행하게 되며, 이를 위하여 WBS의 각 항목에 기초한 형상항목(CI : Configuration Item)을 정의하게 된다. 형상식별 과정의 산출물에는 WBS, 부품목록, 각 검토단계별 기술자료 패키지, 개발계획서, CAD 도면/모델, 기타 형상항목의 설계/개발/시험/제작과 관련된 문서 및 회의록 등이 포함된다. 형상통제 과정에서는 형상식별기준에 의거하여 정의된 형상에 대한 모든 변경 사항의 체계적인 평가, 종합 및 승인/기각 활동을 형상통제위원회(CCB : Configuration Control Board)를 중심으로 수행하게 된다. 형상현황유지 과정에서는 승인된 형상기준(Baseline)을 식별하고 제안/승인/적용된 기술변경의 현황 및 관련 정보에 대한 기록/유지 활동을 수행하게 되며, E-BOM(Engineering Bill of Materials), M-BOM(Manufacturing-BOM), 도면목록, 자료목록, BOM 비교목록 등의 형상 목록을 추출하고 관리하는 작업이 포함된다. 형상확인 과정에서는 제작된 형상품목의 기능적/물리적 특성이 형상식별 문서의 내용과 합치되는지를 기술검토회의 및 기능적/물리적 형상감사를 통하여 확인하고 점검하는 활동을 수행하게 된다.

형상관리실(CMO : Configuration Management Office)에서는 주요 형상관리 활동을 PLM 시스템으로 구현함으로써 관련 업무를 보다 효율적으로 수행할 수 있도록 하였으며^{4,6,10}, 소프트웨어 형상관리에 대한 구체적인 내용 보안을 포함하여 형상관리계획을 갱신하고, 개발사업에 참여하는 전 구성원에 대한 형상관리 관련 교육계획을 수립, 추진할 계획이다.

2.4 중량특성관리

중량특성관리 영역에서는 우주 발사 시스템 설계/개

발/제작/발사의 전 단계에 걸쳐 중량특성값을 할당/분석/관리/검증/보고하는 활동을 수행하게 되며¹¹, 세부 핵심 사항은 다음과 같다.

- 성능, 제어 및 기타 요구조건에 의거하여 관리 대상이 되는 중량특성값의 설정
- 한계중량특성값의 설정
- 요구되는 중량특성값을 체계적으로 관리하기 위한 전산시스템 구성
- 중량특성값 관리 및 검증 방법 규정

우주 발사 시스템 개발의 주요 중량관리 파라미터는 Fig. 2에 나타난 바와 같다.

중량특성관리 영역에서는 중량관리계획을 수립하고, 형상관리, 중량관리 및 설계데이터 작성지침에 의거하여 Pro/E 모델링 및 밀도 입력을 통한 주요 중량특성값(W, cg, MOI, POI 등)을 확보/분석하며, 각 중량특성값의 검증계획에 따른 검증 및 보고를 수행한다. 특히 중량특성 분석 영역에서는 중량특성값의 정확도를 분석하고, 시간에 대한 함수로서의 형상별 중량특성값을 관리하며, 비행후 분석을 통하여 계획된 값과 실제 중량특성값의 차이를 목록화하고 관리하는 활동을 수행한다. 또한 총조립 각 단계 및 시험과정에서 발사체 조립, 운송 및 지상지원장비 제작과 관련하여 중량특성값이 요구되는 경우에도 필요한 중량특성을 즉시 제공할 수 있도록 관리하고, 최종 중량특성값을 측정할 이후의 모든 변경사항은 기록하여 관리하게 된다.

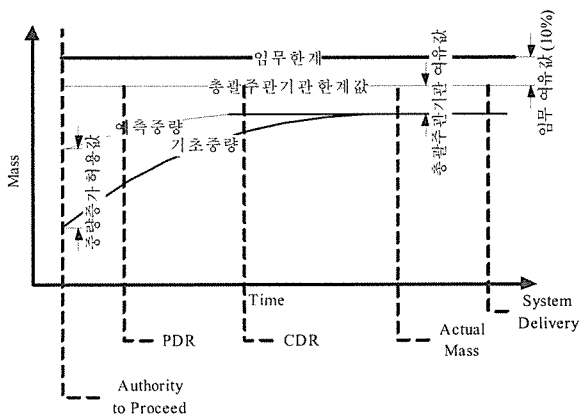


Fig. 2 Mass Properties Control Parameters¹¹

중량특성관리 영역 또한 PLM 시스템에 기본기능이 구현되어 있으며, 개발사업에 참여하는 전 구성원에 대한 중량특성관리 관련 교육계획을 수립, 추진할 계획이다.

2.5 모델링 및 도면관리

우주 발사 시스템의 설계/개발 작업은 통합 CAD 시스템을 중심으로 진행된다. 현재 발사체를 구성하는 각 단의 기능 그룹별로 형상기준을 설정하는 하향 (Top-down) 방식으로 모델링/도면 작업을 수행하고 있으며, 각 단 및 섹셔널 기준평면은 CAD 시스템 관리자에 의하여 통제된다. 모델링 및 도면관리 영역에서는 모델링 및 설계 지침을 작성하고 도면 작성 및 관리 기

준 및 형상관리 영역에서 정의하고 있는 변경 절차에 따라 필요한 업무를 수행한다.

모델링 및 도면관리 영역은 기존의 CAD 시스템과 PLM 시스템의 연결고리이자 PLM 시스템의 주요 관리 대상인 형상항목과 직결된 주요 구성요소이며, 향후 관련 계획 및 지침을 보완하고 참여 구성원들에 대한 교육계획을 수립, 추진할 계획이다.

2.6 인터페이스 관리

형상관리의 한 영역인 인터페이스 관리 영역에서는 발사체, 지상시스템 및 탑재위성 등을 포함한 전체 우주 시스템의 각 구성 요소간 물리적, 기능적 결합성을 보장하기 위하여 필요한 모든 종류/레벨의 인터페이스를 식별/정의/문서화하고 이를 형상관리 영역에서 규정하는 절차에 의거하여 관리하는 활동을 수행하게 된다. 인터페이스 관리 업무 흐름은 Fig. 3에 나타난 바와 같다.

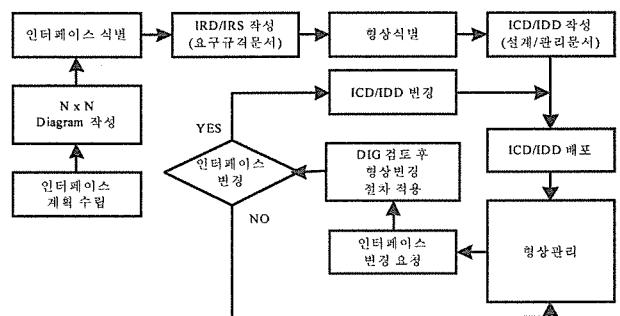


Fig. 3 Interface Control Process

인터페이스 식별 작업은 N×N 다이어그램 작성 과정을 통해서 수행되며, 식별된 인터페이스별로 IRD(Interface Requirements Document)/IRS (Interface Requirements Specification)를 작성함으로써 요구 규격을 도출하게 된다. 도출된 요구규격을 만족하도록 ICD(Interface Control Document)/IDD(Interface Design Description) 등의 인터페이스 설계/관리 문서를 작성하여 설계/제작에 적용하며, ICD/IDD 생성 이후의 모든 관리절차는 형상관리 절차를 따른다.

2.7 품질보증관리

품질보증관리 영역에서는 우주 발사 시스템 개발에 참여하는 전 구성원이 국제표준 품질보증시스템인 ISO9001 및 AS9100에 준하는 기준 및 절차에 의거하여 발사체 개발과 관련된 구매, 제작, 조립, 장착, 검사 및 시험 등의 활동을 효과적이고 체계적으로 수행할 수 있도록 품질보증 활동에 대한 세부지침과 주요절차를 제공하고 품질보증관리 활동을 수행한다¹². 품질보증 관리는 그 특성상 외부의 독립적인 조직이 수행하는 것이 일반적이며, 우주 발사 시스템 개발에 있어서는 우주발사체사업단 외부의 품질인증센터에서 다음과 같은 품질보증 관리 업무를 수행한다.

- 계약단계에서의 품질보증 관련 조항 검토
- 제출된 품질보증이행계획서 및 품질시스템

- 메뉴얼, 절차서, 기준서 등 검토
- 부적합품 자재심의 절차 구축
- 도면의 제작성 및 검사가능성 검토 지원
- 주요 규격서, 검사/시험 절차서, 제조, 조립 공정서의 적합성 검토
- 특수 공정 승인 지원
- 치공구 검증
- 품질시스템 요건 준수 여부 확인 및 감사
- 제품 검사 및 시험

2.8 조달관리

조달관리 영역에서는 성공적인 우주 발사 시스템 개발을 위하여 필요한 제품 또는 서비스를 외부로부터 획득하는 일련의 과정을 정의하고 수행하게 되며, 조달관리 영역의 주요 업무 흐름은 다음과 같다.

- 조달계획 수립
- 제안요구서 작성 및 제안요구 설명회를 통한 공급자 유치 계획 수행
- 공급자 제안설명회 개최를 통한 공급자 유치
- 공급자 제안 검토/평가 및 선정
- 공급 계약 체결 및 수행
- 계약 종료

계약 종료 이후에는 계약관련 자료 및 최종 규격의 보존, 유효성 분석 및 교훈 작성 등의 활동을 수행하게 된다. 이러한 일련의 모든 업무 흐름은 사업단의 참여 기업 관리지침에 의거하여 계약 체결 및 관리 업무를 수행할 수 있도록 하고 있으며, 참여기업은 우주 발사 시스템 개발에 적용 중인 모든 기술관리 영역에서 제시되는 요구조건에 부합하도록 사업수행계획을 수립하고 이행함을 보증하여야 한다.

2.9 신뢰성 관리

신뢰성 관리 영역은 설계 과정에서의 신뢰성 분석, 설계 검토, 절충 연구 및 신뢰성 시험 분석 등의 기능을 포함하는 설계신뢰성 관리와 고장 분석, 현장작업보고, 수정조치 등의 기능을 포함하는 운용신뢰성 관리의 두 영역으로 크게 구분할 수 있다. 우주 발사 시스템 개발에 있어서의 신뢰성 관리를 위해서는 충분한 시스템 개발 경험 및 각 부품에 대한 데이터베이스 구축이 선행되어야 하며 위험관리, 품질관리, 검증관리 등 다른 기술관리 활동과 밀접하게 연계 수행하여야 한다¹³.

현 단계에서의 신뢰성 관리 영역의 목표는 국제협력 파트너의 신뢰성 관리 활동 추적 및 현황 관리를 포함하여 현 단계에서 적용 가능한 설계신뢰성 관리계획을 수립하고 관리하는 것으로, 다음 내용을 중심으로 수행한다.

- 신뢰성 시험계획 수립
- 신뢰성 데이터 통계 분석 및 데이터베이스 구축
- 생산, 품질보증, 구매활동 수행시 신뢰성 정보 제공

또한 다음 영역의 활동을 일부 수행하거나 차기 개발 과제에서 적용할 수 있도록 준비하는 작업을 수행한다.

- 신뢰성 추정/예측 및 신뢰성 성장 계획 수립

- 신뢰성 할당, 신뢰성 시험계획 수립
- 구매 품목에 대한 신뢰성 규격 도출
- 신뢰성 관리 결과 보고

2.10 위험 관리

대형화/고도화된 시스템 개발사업을 성공적으로 추진하기 위해서는 잠재 위험을 식별하고 분류/평가한 후 위험 완화/제거 계획을 수립하고 시행하는 위험 관리 영역의 적용이 필수적이다¹⁴. 우주 발사 시스템 개발 과정 중 적용되는 위험 관리 업무는 Fig. 4에 나타낸 바와 같다. 위험 분석 및 등급화를 포함한 종합적인 위험 관리 업무를 수행하기 위하여 위험관리팀을 구성하고, 식별된 위험의 등급(Normal/Major/Critical)에 따라 위험관리위원회(RMB: Risk Management Board)를 중심으로 위험 대처/완화 계획을 수립하고 시행하게 된다.

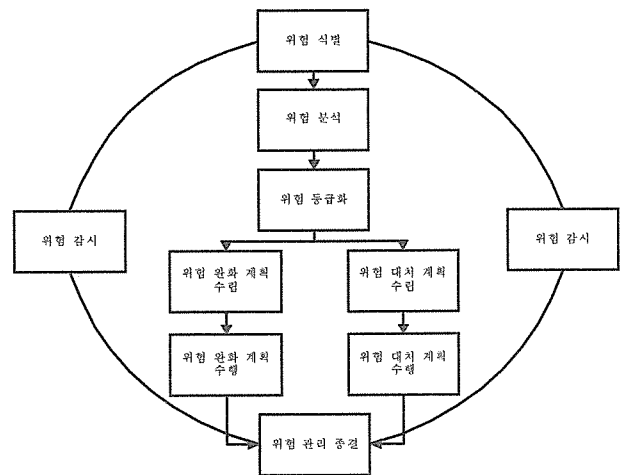


Fig. 4 Risk Management Process

2.11 검증관리

우주 발사 시스템을 구성하는 모든 하드웨어 및 소프트웨어가 임무설계 요구조건 및 성능 요구조건을 만족하는지 확인하기 위해서는 개발단계별로 전 과정에 걸친 검증작업이 체계적으로 수행되어야 한다¹⁵. 우주 발사 시스템 개발에 최적화된 검증계획을 수립하기 위해서는 신뢰성/위험/품질보증 관리 등의 타 기술관리 영역과 연계하여 필수 시험항목을 우선 선정하고 집중 관리할 수 있도록 검증 요구조건을 설정하는 작업이 필수적이다. 검증관리 영역에서 적용하는 검증 방식으로는 분석/유사/시험/모사/검사 등이 있을 수 있으며, 검증의 대상이 되는 우주 발사 시스템 구성 조립체의 수준 및 모델을 정의하고, 각각의 대상에 대하여 개발/인증/수락/비행준비/비행 후의 각 단계에 대한 검증 절차 및 체계를 수립하고 관리한다. 우주 발사 시스템 개발 검증관리 영역에서는 시편시험, 축소형시험, 목업시험, 기능시험, 환경시험, 정하중 및 압력시험, 기밀시험, 동적균형 및 정렬 시험, 모달시험, 분리시험, 연계시험, 하드웨어-루프시험, 연소시험 등의 시험평가 항목을 고려하고 있으며, 이를 검증 대상 및 내용에 따라 최적화하여 적용할 계획이다.

2.12 PLM 시스템 구축

우주 발사 시스템 개발에 적용 중인 시스템 엔지니어링 관리기법의 보다 효율적인 운용을 위하여 PLM 시스템을 개발, 운용하고 있다. 중장기적으로는 사업관리 영역으로까지의 확장을 고려하여 단계별 PLM 시스템 구축 사업을 전개하고 있으며, 현재 1단계로 개발된 PLM 시스템에는 WBS에 기반한 형상관리 및 자료관리 영역을 중심으로 BOM 관리, 중량특성관리, My Desk, 검색 기능 등이 구현되었다.

향후 국제협력을 중심으로 우주 발사 시스템 개발을 추진함에 있어 PLM 시스템을 보다 효과적으로 활용하기 위해서는 자료 보안 체계, 시스템 요구조건 관리, WBS 관리, 자료 관리, 형상 관리, 중량특성 관리 등의 기능을 수정, 보완하여야 하며, 필요시 추가적인 개발 규격을 신속히 도출하여 점진적으로 PLM 시스템 응용 영역을 확대해 나갈 계획이다.

3. 결론

성공적인 우주 발사 시스템 개발을 위하여 필요한 시스템 엔지니어링 기법 및 적용 사례를 소개하였다. 현재 시행 중인 기술관리 통합화 계획을 기반으로 우주 발사 시스템 개발 조직 운용, 개발 추진 방향 및 관리 메커니즘 등이 통합적으로 가시화된 시스템 엔지니어링 관리계획을 확립하기 위해서는 다음과 같은 요소들을 종합적으로 고려하고 계획하여야 한다.

- 기술 프로그램의 계획, 관리 및 검토
- 시스템 엔지니어링 과정 및 방법론
- 다양한 엔지니어링 분야간 통합
- 성능관리 및 검토관리 방안
- 일정 및 마일스톤
- 조직 구성 및 책임

무엇보다도 국제협력 중심의 사업 추진 방향 및 개발여건을 고려하여 현실적으로 적용 가능한 시스템 엔지니어링 관리계획을 수립하고 실행하는 것이 우주 발사 시스템 개발 성공 여부를 결정하는 주요인자 중 하나가 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Miok Joh et al., Analysis of Systems Engineering Management Techniques for Launch Vehicle Development, The 4th Symposium on Space Launch Vehicle Technology, pp. 162-167, 2003.
2. NASA Systems Engineering Handbook, SP 610S, June 1995.
3. Robert Halligan, Systems Engineering - From Awareness of Need to Retirement from Use, Project Performance International, May 19-23, 2003.
4. Chul Hoon Cho et al., A Study on PLM/PDM Application for Launch Vehicle Development, The 4th Symposium on Space Launch Vehicle Technology, pp. 158-161, 2003.
5. Soondo Hong et al., Planning of Information Systems

- for KSLV, The 4th Symposium on Space Launch Vehicle Technology, pp. 168-171, 2003.
6. Young-In Choi et al., A Study on PLM System for KSLV-I, The 5th Symposium on Space Launch Vehicle Technology, pp. 405-408, 2004.
7. Joon Ho Lee, et al., Work Breakdown Structure of Launch Vehicle, The 5th Symposium on Space Launch Vehicle Technology, pp. 393-395, 2004.
8. Generic Space System Work Breakdown Structure, May 24, 1989.
9. Byoung-Gyu Cho et al., Configuration Management Plan for KSLV-I, The 5th Symposium on Space Launch Vehicle Technology, pp. 384-388, 2004.
10. Chang Bae Lee et al., A Study on Configuration Control Management Plan in KSLV-I PLM/PDM System, The 5th Symposium on Space Launch Vehicle Technology, pp. 389-392, 2004.
11. Chul Hoon Cho et al., Mass Properties Control for Launch Vehicle Development, The 5th Symposium on Space Launch Vehicle Technology, pp. 379-383, 2004.
12. Byoung-Gyu Cho et al., Quality Assurance Management Plan for KSLV-I, The 5th Symposium on Space Launch Vehicle Technology, pp. 397-400, 2004.
13. Ki-Seok Kim and Kyoum-Su Seo, Reliability Management in KSLV-I Program, The 5th Symposium on Space Launch Vehicle Technology, pp. 401-404, 2004.
14. Kyoum-Su Seo et al., Risk Management Planning and Activities in KSLV Development Program, The 5th Symposium on Space Launch Vehicle Technology, pp. 409-412, 2004.
15. Young-Doo Chun et al., Verification Management of a Space Launch Vehicle, The 5th Symposium on Space Launch Vehicle Technology, pp. 413-417, 2004.