

## 우주발사체 개발사업을 위한 기술성능관리 프로세스

유일상· 조동현· 김근택

한국항공우주연구원

### A Process of the Technical Performance Management for A Space Launch Vehicle R&D Project

Il Sang Yoo, Dong Hyun Cho, Keun Taek Kim

*Korea Aerospace Research Institute*

**Abstract** : To enhance success probability of a system development project, its overall risk level should be minimized through systematically managing schedules, costs, and technical performances. However, Attempts to manage technical performance compared to numerous efforts to control costs and schedules in such projects are deficient. Particularly, a space launch vehicle, a large complex system, development project is much less likely to meet its technical performance objectives due to its technological difficulty, along with schedule delay and cost overrun. The technical performance management (TPM) is a method for tracking and managing technical progress in order to achieve technical performance targets within schedule and budget. In this paper, we investigate applications of the TPM in several space launch vehicle development projects. Then we propose and validate the TPM process to achieve a successful mission in such projects.

**Key Words** : Technical Performance Management (TPM), MOEs (Measures of Effectiveness), MOPs (Measures of Performance), TPMs (Technical Performance Measures), Space Launch Vehicle

---

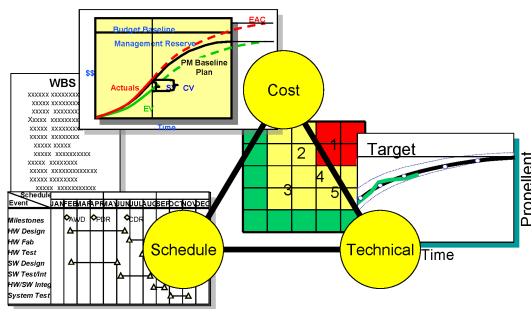
\* 교신저자 : isyoo@kari.re.kr

\* This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 1. 서론

2000년대 들어 우주선진국은 국가 안보, 국민 삶의 질 향상 등 국가 발전을 위한 중점 분야로 우주 개발을 추진하는 새로운 우주경쟁 시대에 돌입하였다. 우주발사체는 우주공간으로의 접근을 위한 유일한 운송 수단으로서 우주개발을 위한 필수적인 체계이다(Yoo et al., 2013). 우주발사체는 탑재체를 목표궤도에 투입하기 위해 적절한 고도와 투입속도를 제공하는 로켓이다. 우주발사체는 극한 기술이 적용되는 대형복합체계로서 선진국의 개발사례를 보면 장기적인 계획에 따라 막대한 예산과 기술적 시행착오를 거쳐야만 개발할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이처럼 개발된 우주발사체를 신뢰성과 경제성을 갖춘 안정된 발사체로 더욱 발전시키기 위해서는 추가적으로 많은 비용과 기간이 더 투입되어야 한다.

일반적으로 체계 개발사업은 정해진 예산과 기간 한도 내에 이해관계자의 기대사항을 만족하는 체계를 연구개발하여 제작·납품하는 활동이다. 이러한 사업을 성공적으로 수행하기 위해서는 비용, 일정, 기술적 성능의 3중 제약조건을 모두 만족하는 체계를 개발하여야 한다. 그래서 그림 1과 같이 일정, 비용과 기술적 성능을 체계적으로 관리하여 전체적인 위험 수준을 최소화함으로써 체계 개발사업의 성공 가능성을 높여야 한다.



[Figure 1] Triple constraint management(Armstrong, 2008)

국내외 체계 개발사업에서 비용과 일정을 관리하기 위해 EVM(Earned Value Management),

PERT(Program Evaluation and Review Technique)/CPM(Critical Path Method), CCM(Critical Chain Method) 등 다양한 방법을 적용하려는 노력을 활발하게 하고 있으나, 기술적 성능을 관리하는 방법인 기술성능관리(TPM, Technical Performance Management) 등은 미흡한 상황이다.

체계 개발사업은 연구개발 과정에서 예상할 수 있는 위험(Known Unknowns)과 예상할 수 없는 위험(Unknown Unknowns)의 불확실성이 잠재되어 있다. 특히, 우주발사체와 같은 대형복합체계 개발사업은 예상할 수 없는 기술적 위험이 매우 큰 도전적인 프로젝트이다. 표 1에 나타난 우주발사체의 발사 성공률(Cho et al., 2014)을 통해 우주발사체 개발사업의 기술적 성능 목표 달성이 어렵다는 것을 간접적으로 알 수 있다. 우주발사체 개발 초창기인 1950년대의 발사 성공률은 44% 수준이었으나 현재까지도 연대별 평균 발사 성공률은 90% 전후로 기술의 성숙화에 상관없이 여전히 우주발사체 개발이 쉽지 않음을 알 수 있다. 상용화된 우주발사체조차도 발사 성공률이 대략 90~95% 수준으로 일반적인 상용 제품의 신뢰성 목표인 6σ에 비하면 매우 낮은 수준이다.

<Table 1> Chronological orbital launch success rate

Decade	Launch	Failure	Success Rate
1950s	48	27	0.44
1960s	990	167	0.83
1970s	1231	84	0.93
1980s	1192	54	0.95
1990s	892	64	0.93
2000s	662	39	0.94
2010s	317	19	0.94
TOTAL	5332	454	0.91

대형복합체계인 우주발사체 개발사업은 사업 추진 기간 동안의 불확실성으로 인해 일정 지연, 비용 상승과 함께 기술적 성능 미달의 가능성이 매우 높다. 따라서 우주발사체 개발사업에서 개발 일정과 예산 범위 내에서 기술적 성능 목표를 달성하기 위

해 개발 전 과정에서 기술적 진척상황을 추적·관리하는 기술성능관리(TPM)의 적용이 필요하다. 본 연구는 항공우주 분야에서 기술성능관리 적용현황을 조사·분석하여 우주발사체 개발사업의 성공적인 임무 달성과 체계 개발을 위한 기술성능관리 프로세스를 제안하고자 한다.

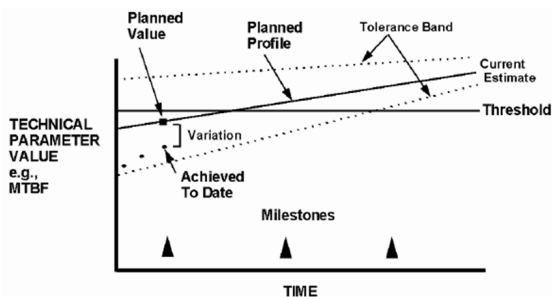
## 2. 항공우주 분야의 기술성능관리 현황 분석

### 2.1 기술성능관리 개요

SE 커뮤니티에서 TPM이라는 용어는 기술성능 측정(Technical Performance Measurement), 기술측정(Technical Measurement) 등으로 불리며, 본 연구에서는 이를 통칭하여 기술성능관리(TPM)로 정의한다.

기술성능관리는 체계 개발사업의 임무 달성과 기술적 의사결정에 필요한 통찰력을 제공하는 중요한 성능 파라미터를 기술척도로 선정하여 그 상태를 추적 관리함으로써 성능 요구조건 준수와 개발 진척사항 확인, 그리고 개발 위험과 현안을 평가하여 임무 달성의 가능성을 높여주는 활동이다.

기술성능관리는 선정한 기술척도의 요구조건 또는 규격, 개발 단계별 계획값과 허용범위 등 성능계획 프로파일(Planned Performance Profile)을 그림 2와 같이 사전 계획하고, 주기적으로 계획값 대비 실제값과의 차이를 측정하여 임무 또는 체계에 미치는 영향을 판단하게 한다. 기술척도가 계획된 허용범위를 벗어나는 경우, 적절한 시정조치가 이루어져야 한다.

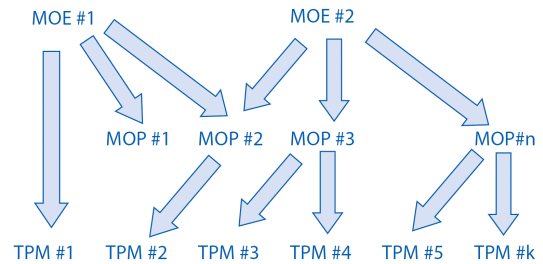


[Figure 2] Example of Planned Performance Profile(INCOSE, 2005)

체계 개발사업에서 기술성능관리 계획은 엔지니어링 최상위 계획서인 체계공학관리계획서(SEMP, Systems Engineering Management Plan)에 기술척도 목록, 업데이트 일정, 모니터링 책임, 위험관리와의 관계 등을 포함한 사항을 간략히 작성하거나(U.S. Air Force, 2005) 보다 구체적인 계획은 별도 계획서로도 작성할 수 있다.

### 2.2 기술척도(Technical Measures) 계층구조

대부분의 체계공학 표준서(IEEE Std 1220, 2005; EIA-632, 1999; ISO/IEC 15288, 2008)와 국제체계공학회(INCOSE, International Council on Systems Engineering), 항공우주 연구기관 등의 핸드북(INCOSE, 2011; NASA, 2007; NASA Marshall Space Flight Center; U.S. Air Force, 2005; INCOSE, 2005)에서 기술성능관리를 위한 기술척도를 그림 3과 같이 체계효과척도(MOEs, Measures of Effectiveness), 체계성능척도(MOPs, Measures of Performance), 기술성능척도(TPMs, Technical Performance Measures)로 구분하고 있다.



[Figure 3] Hierarchy of technical measures(NASA, 2007)

체계효과척도(MOEs)는 개발사업의 임무 달성 측면에서 체계의 효과성을 나타내는 지표이다. 체계성능척도(MOPs)는 주어진 임무를 달성하기 위해 개발하는 체계의 물리적이거나 기능적 성능을 나타내는 지표이다. 체계성능척도(MOPs)는 체계효과척도(MOEs)로부터 도출된다. 기술성능척도(TPMs)는 개발하는 체계의 특정 성능의 하위 수준 측면에서 체계 구성요소의 성능을 나타내는 지표이

다. 기술성능척도(TPMs)는 체계성능척도(MOPs)로부터 도출되지만 일부는 체계효과척도(MOEs)로부터 도출할 수 있다. 기술척도는 관련 요구조건과 그리고 관련 기술척도간의 추적성을 가지도록 한다. 기술척도의 특징을 표 2에 제시한다.

<Table 2> Characteristics of technical measures

구분	MOEs	MOPs	TPMs
특징	체계 임무	체계 개발 목표	기술지표
	운영 환경에서 달성해야 하는 임무목표	임무목표 달성을 위한 체계의 물리적 속성과 기능적 속성	개발주기 동안 체계 구성요소의 구현에 대한 측정 가능한 속성

2.3 기술척도 사례

항공우주 연구개발 기관인 NASA와 미국 공군 우주/미사일시스템 센터(SMC)의 핸드북(NASA, 2007; U.S. Air Force, 2005)과 NASA가 수행한 Constellation Program의 CSLV(Constellation Systems Launch Vehicle) 개발을 위한 SEMP(NASA Marshall Space Flight Center, 2006)에서 제안된 기술척도를 조사하여 표 3에 제시한다. 우주발사체 개발을 위해 궤도투입 중량, 이륙중량, 추력/비추력, 신뢰도 등을 공통적인 기술척도로 사용하고 있다.

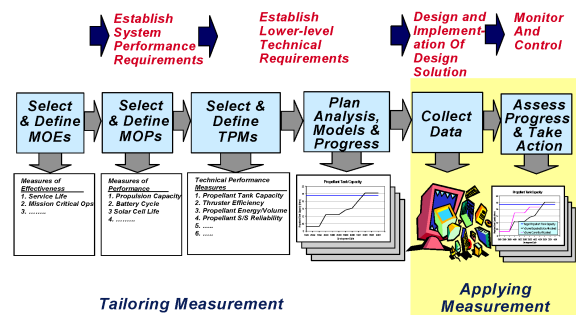
<Table 3> Technical measures related to launch vehicle R&D projects

출처	기술척도
NASA SE HB	Safety, Thrust versus predicted/specified, Isp versus predicted/specified, Total vehicle mass at launch, Payload mass at nominal altitude or orbit, Propellant margins at EOM, Control system stability margins, EMI/EMC susceptibility margins, Reliability, System turnaround time, Fault detection capability Percentage of system designed for on-orbit crew access Mean time before refurbishment required, Total crew maintenance time required

SMC SE HB	Total vehicle mass at launch, Payload mass at nominal altitude or orbit, Payload volume, Injection accuracy, Launch reliability, In-flight reliability, For reusable vehicles, percent of value recovered, For expendable vehicles, unit production cost at the n <sup>th</sup> unit, Booster(Stages I, II, III, etc.) Measures, Solid Rocket Motors Measures, Liquid Motors Measures, Fairing Measures, Guidance and Control Measures, Integration and Assembly Measures, Test and Checkout Measures
CSLV SEMP	Loss of Mission, Recurring Cost, Mass to Orbit Injection Point, Time to launch ready after final element arrival at launch site, Launch Probability exclusive of weather conditions, Launch Probability due to natural environments

2.4 기술성능관리 프로세스 사례

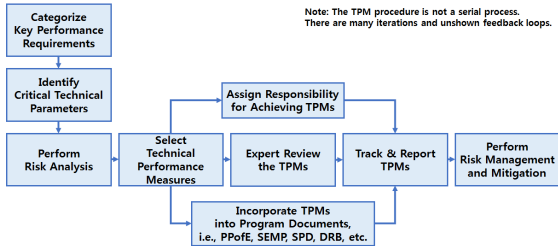
INCOSE(INCOSE, 2005)는 체계효과척도(MOEs), 체계성능척도(MOPs)와 기술성능척도(TPMs)을 포함한 기술측정 수명주기 프로세스를 그림 4와 같이 제시하였다. 체계효과척도(MOEs), 체계성능척도(MOPs)와 기술성능척도(TPMs)를 단계적으로 선정한 후 성능계획을 수립한 다음, 관련 자료를 수집하여 추적 및 조치하는 프로세스이다. INCOSE는 제시한 프로세스에 따라 가상의 위성 개발 사업을 대상으로 기술척도 선정과 기술척도 모니터링 활동에 대한 개념적인 예를 제시하였다.



[Figure 4] INCOSE TPM process

BAE Systems(Oakes et al., 2004)의 기술성능

관리 절차는 그림 5와 같다. 핵심 성능 요구조건에서 중요하고 위험도가 높은 기술 파라미터를 기술 성능척도로 선정하고 이후 추적 관리하는 프로세스이다.



[Figure 5] BAE Systems TPM process

### 3. 우주발사체 개발사업을 위한 기술성능관리 프로세스 제안

#### 3.1 기술성능관리 프로세스

본 연구는 우주발사체 개발사업의 효과적이고 효율적인 기술성능관리 수행을 위해 기술척도 식별, 기술척도 분석 및 선정, 기술성능 측정 계획 수립 및 이행, 기술척도 추적 및 통제의 4가지 활동으로 제안한다. 이와 함께, 각 프로세스 활동의 수행 조직으로 기술성능관리와 관련한 제반 업무 수행 및 의사결정 등을 수행하는 기술성능관리위원회(PCB : Performance Control Board), 기술성능관리위원회의 원활한 기술성능관리 활동을 위하여 기술성능관리 업무를 전담하는 기술성능관리 조직, 기술척도에 대한 성능계획 프로파일 수립, 이행 및 결과 보고를 수행하는 기술성능척도 담당 조직을 제안한다. 본 연구가 제안하는 기술성능관리 프로세스는 그림 6과 같으며, 이러한 프로세스 활동에서 나오는 기술척도에 관한 정보는 표 4의 기술척도 등록부에 기록하여 지속적으로 관리한다. 제안한 프로세스를 적용하기 전에 적용시점, 관리번호 체계, 기술성능측정 및 보고시기, 기술척도 위험성 분석 기준 등 기술성능관리 세부방침을 결정하여야 한다.

##### 3.1.1 기술척도 식별

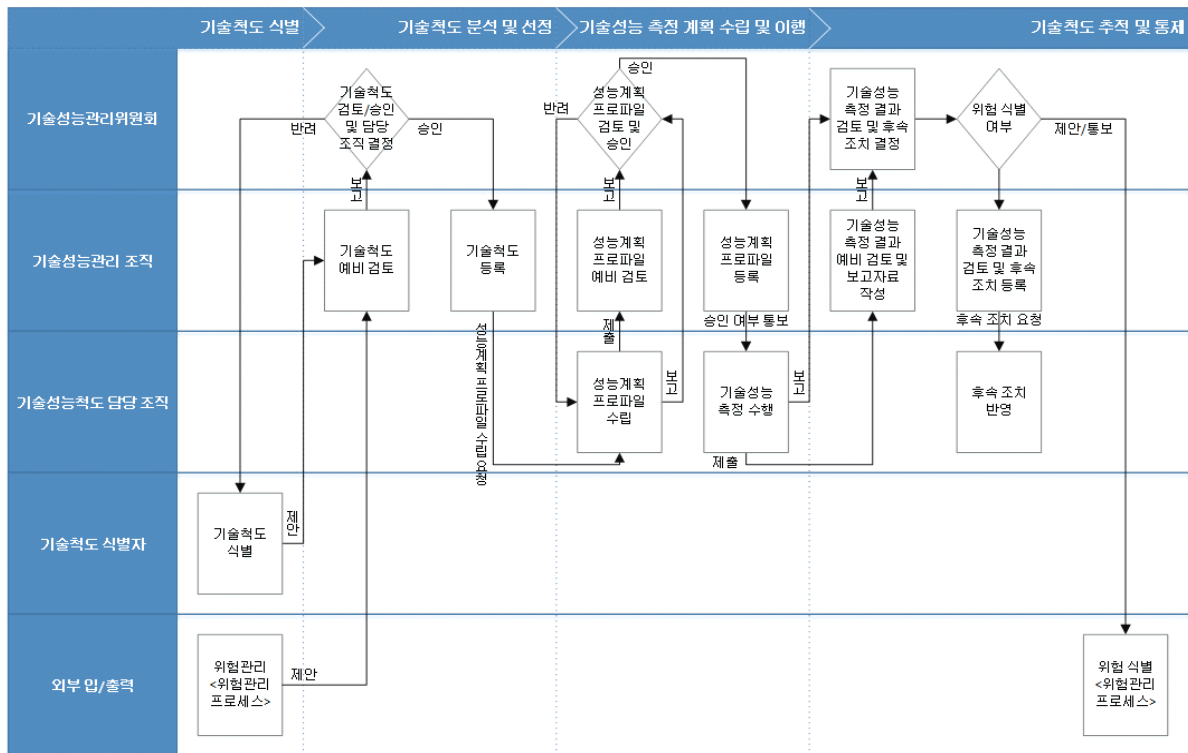
기술척도 식별은 개발 전 주기 동안 임무 달성 또는 기술적 요구조건 만족 여부를 판단하기 위해 기술성능을 추적할 중요한 성능 파라미터를 기술척도로 식별하는 활동이다.

체계공학의 요구조건 분석 및 할당 프로세스를 통해 수립된 임무 요구조건, 체계 요구조건, 구성요소 요구조건 등을 분석하여 발사체 사업의 기술척도를 체계적으로 식별하고 체계효과척도(MOEs), 체계성능척도(MOPs)와 기술성능척도(TPMs)로 구분한다.

<Table 4> Technical measures register

KSLV-II Technical Measure Register													
											As of YY MM DD		
(1) ID	(관리번호)				(2) Title				(기술척도명)				
(3) WBS ID					(4) WBS Name								
(5) Description	(기술척도의 중요성, 위험성 등을 고려한 관리 필요성)												
(6) Risk Magnitude	(6)-1 Severity			1. <input type="checkbox"/> Low 2. <input type="checkbox"/> Medium 3. <input type="checkbox"/> High									
	(6)-2 Likelihood			1. <input type="checkbox"/> Low 2. <input type="checkbox"/> Medium 3. <input type="checkbox"/> High									
	(6)-3 Risk Index (R=S*L)						(6)-4 Risk Level						
(7) Source	(7)-1 Requirement			(7)-1.1 ID									
				(7)-1.2 Title									
				(7)-1.3 Description									
	(7)-2 Specification			(7)-2.1 ID									
			(7)-2.2 Title										
			(7)-2.3 Description										
(8) Planned Performance Profile	SR	SDR	PDR1	PDR2	CDR1	CDR2	QR1	FRR	CDR3	QR2	FRR1	FRR2	Note
(8)-1 Goal or Req													관리 조직
(8)-2 Upper Limit													관리 상한값
(8)-3 Lower Limit													관리 하한값
(8)-4 Planned Value													관리 계획값
(8)-5 Actual Value													관리 측정값
(8)-6 Current Estimate													관리 추정값
(8)-7 Measuring Method	(문서)	(장사)	(시연)	(시험)									(유형명)
(9) Current Situations & Action Items	(기술척도 상태(계획값/측정값 편차, 최종리얼성값/요구조건간의 편차 등), 체계관리위원회 결정사항, 후속 조치 계획 및 이행 결과 등)												
(10) Related Risks	(관련 위험 ID/제목)												
(11) Related Documents	(관련 문서 ID/제목)												
(12) Remarks													
(13) Responsibility	(실무담당 조직명 / 책임자)				(14) Confirmation				(관리담당 조직명 / 담당자)				
(15) Registered Date	(등록일)				(16) Closed Date				(종료일)				

체계효과척도(MOEs)는 발사체 사업의 임무 달성 측면에서 체계의 효과성을 나타내는 지표로서, 임무 요구조건으로부터 도출한다. 체계성능척도(MOPs)는 주어진 임무를 달성하기 위해 개발하는 체계의 물리적이거나 기능적 성능을 나타내는 지표로서, 체계 요구조건으로부터 도출한다. 기술성능척도(TPMs)는 개발하는 체계의 특정 성능의 하위 수준 측면에서 체계 구성요소의 성능을 나타내는 지



[Figure 6] A TPM process for a space launch vehicle R&D project

표로서, 구성요소 요구조건으로부터 도출한다. 기술 성능척도(TPMs)는 체계성능척도(MOPs)로부터 도출되지만 일부는 체계효과척도(MOEs)로부터 도출할 수 있다. 기술척도는 관련 요구조건과 그리고 관련 기술척도간의 추적성을 가지도록 한다.

기술척도를 식별하기 위해 먼저 대상 요구조건을 선정해야 하며, 이에 대한 고려사항은 아래와 같다.

- 임무 달성, 고객 만족 및 체계 유용성에 영향을 주는 중요한 요구조건
- 위험성이 높거나 현재 요구 성능을 만족시키지 못하고 있는 요구조건
- 성능을 관리할 수 있는 요구조건
- 사업책임자가 비용, 일정과 성능을 재조정할 수 있는 요구조건

이후 선정된 요구조건과 관련한 여러 기술지표 중에서 기술척도를 식별해야 하며, 이에 대한 고려사항은 아래와 같다.

- 기술검토, 감사, 시험 등과 같은 주요 시점에서 모니터링하는 중요한 지표
- 시험, 검사, 시연 또는 분석을 통해 측정 가능한 지표
- 과거 데이터 이력 또는 시험 계획을 통해 타당한 성능계획 프로파일을 수립할 수 있는 지표

이와 달리, 과거 발사체 개발 사례 및 경험, 현재 개발 수행 현황 등을 통해 우주발사체 사업에 중요하거나 위험하다고 판단되는 성능 파라미터를 기술척도로 직접적으로 식별할 수 있다.

### 3.1.2 기술척도 분석 및 선정

기술척도 분석 및 선정은 식별된 기술척도의 중요성, 위험성 등을 고려하여 기술성능관리 대상으로 공식 선정하는 활동이다.

기술척도의 추적에 인적 또는 물적 자원이 소요되므로 식별된 기술척도 후보 중 임무 달성 및 체계

개발 지표로서 중요하거나 위험성이 있는 핵심 성능 파라미터만으로 제한하여 기술척도로 선정하는 것을 원칙으로 한다. 개발 과정에서 새로운 기술척도 식별, 기술척도 위험성 완화, 성능 요구조건 변경 등이 발생하는 경우 기술척도를 추가, 수정 또는 종료할 수 있다.

### 3.1.3 기술성능측정 계획 수립 및 이행

기술성능측정 계획 수립 및 이행은 선정된 기술척도에 대해 성능계획 프로파일을 수립하고 이에 따라 주기적으로 기술성능측정을 수행하는 활동이다.

선정된 기술척도의 요구조건 또는 규격, 개발 단계별 목표값, 계획값, 허용범위, 측정방법 등을 포함하는 성능계획 프로파일을 수립한 후 주기적으로 계획값 대비 측정값과의 차이, 개발 완료 시 달성 가능한 예상값 등을 측정하여 임무 또는 체계 성능에 미치는 영향을 판단한다. 성능계획 프로파일은 시기적, 기술적, 측정 적절성 등을 고려하여 실제 이행 가능하도록 수립하여야 한다.

### 3.1.4 기술척도 추적 및 통제

기술척도 추적 및 통제는 기술척도의 상태를 모니터링하여 후속 조치를 이행하고, 기술척도와 관련한 모든 정보를 유지 관리하는 활동이다.

기술척도의 상태를 주기적으로 모니터링하여 성능계획 프로파일 대비 실제 달성 정도를 지속적으로 확인한다. 특히 측정값이 수립된 허용범위를 벗어나는 기술척도는 반드시 적절한 후속 조치가 이루어질 수 있도록 한다.

## 3.2 적용 예

본 연구가 제안한 기술성능관리 프로세스를 가상 발사체 개발사업에 적용하여 확인(Validation) 하였으며 그 결과를 그림 7과 그림 8에 제시하였다. 발사체의 최상위 임무 요구조건에서 탑재체 투입중량을 체계효과척도(MOEs)로 식별, 분석 및 선정하였다. 요구조건간의 하향적 추적관계에 따라 임무 요구조건에 영향을 주는 체계 요구조건 중 이륙중량을 체계성능척도(MOPs)로, 이어서 구성요소 요구조건 중 각 단의 이륙중량을 기술성능척도(TPMs)로 식별, 분석 및 선정하였다. 그림 7은 기



[Figure 7] Hierarchy of technical measures in a virtual space launch vehicle R&D project

술척도의 계층구조를 보여준다. 그림 8은 식별된 기술척도인 탑재체 투입중량, 이륙중량과 각 단의 이륙중량에 대한 성능계획 프로파일을 수립하고 기술 성능을 측정하고 추적 및 통제된 결과를 보여준다.

#### 4. 결론

체계 개발사업의 성공 가능성을 높이기 위해서는 일정, 비용과 기술적 성능을 체계적으로 관리하여 전체적인 위험 수준을 최소화하여야 한다. 그러나 국내외 체계 개발사업에서 비용과 일정을 관리하려는 노력에 비해 기술적 성능을 관리하려는 노력은 미흡한 상황이다. 특히, 대형복합체계인 우주발사체 개발사업은 개발의 불확실성으로 인해 일정 지연, 비용 상승과 함께 기술적 성능 미달의 가능성이 매우 높다. 이러한 개발사업에서 개발 일정과 예산 범위 내에서 기술적 성능 목표를 달성하기 위해 개발 전 과정에서 기술적 진척상황을 추적·관리하는 기술성능관리의 적용이 필요하다.

본 연구는 항공우주 분야에서 기술성능관리 적용 현황을 조사·분석하여 우주발사체 개발사업의 성

공적인 임무 달성과 체계 개발을 위한 기술성능관리 프로세스를 제안하고 가상의 발사체 개발사업에 적용하여 확인하였다.

제안된 프로세스는 향후 국내외의 우주발사체 개발사업과 또한 대형복합체계 개발사업에도 적용되어 개발사업의 성공 가능성을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

#### References

1. Armstrong, J., "Technical Performance Measures : Connecting Technical and Management Progress", James R Armstrong Consulting Services. Sep. 2008
2. Cho, D. H., Yoo, I. S., Kim, K. T., "Trends and Analysis of Space Launch Failures", Bulletin of the Korean Space Science Society, Vol. 23, No. 1, pp. 65, April, 2014
3. Choi, S., "A Study on Technical Measures and Their Application", Journal of the Korea Society of Systems Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 3~8, 2007



[Figure 8] Technical measure registers in a virtual space launch vehicle R&D project



4. EIA-632, Processes for Engineering a System, Jan. 1999
5. Hur, J., Noh, H., "A Study on TPM for Performance Management of Weapon System R&D Program", Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 13, No. 4, pp. 612~618, Aug. 2010
6. IEEE Std 1220, IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process, Sep. 2005
7. INCOSE, Technical Measurement v.1, Dec. 2005
8. INCOSE, Systems Engineering Handbook, v.3.2.1, pp.240-249, 2011
9. ISO/IEC 15288, Systems and software engineering — System life cycle processes, 2nd Edition, Feb. 2008
10. NASA Marshall Space Flight Center, Constellation Systems Launch Vehicle (CSLV) Systems Engineering Management Plan(SEMP) v1.0, pp.51~53. May 2006
11. NASA Marshall Space Flight Center, Project Management and Systems Engineering Handbook, Rev. B
12. NASA, Space Systems Engineering, version 1.0, Technical Performance Measures Module & Margins and Contingency, <http://spacese.spacegrant.org/>
13. NASA, Systems Engineering Handbook, Rev. 1, Dec. 2007
14. Oakes, J, Botta, R., Bahill T., Technical Performance Measures, 2004
15. U.S. Air Force, Space & Missile Systems Center, Systems Engineering Primer & Handbook, 3rd Edition, pp 90~91, 216, 256-258, April 2005
16. Yoo, I. S., Cho, D. H., Hong, I. H., "Global Trends of Space Launch Vehicle Technology", Bulletin of the Korean Space Science Society, Vol. 22, No. 1, pp. 62, April, 2013