

技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2012.40.3.264>

항공우주개발 프로젝트에서 개발기간과 비용에 대한 TRL의 영향 분석

황형원*, 김홍래*, 장영근**

TRL Impact on Development Schedule and Cost
in the Aerospace Project

Hyung-Won Hwang*, Hong-Rae Kim* and Young Keun Chang**

ABSTRACT

TRL has a direct impact on development schedule and cost in the system or technology development projects. If TRL capability of development organization for specified CTEs can be accurately assessed and the impact of TRL on development schedule and cost are analyzed as detailed as possible, the risk of development schedule delay and cost increase can be minimized during the development process. This paper describes analysis results of TRL impact on development schedule and cost in the aerospace project. The development schedule and cost change are quantitatively estimated for the TRL improvement in the Unmanned Aerial Vehicle(UAV) system development program.

초 록

시스템개발 프로젝트에서 기술성숙도(TRL; Technology Readiness Level)는 개발기간과 비용에 직접적인 영향을 미친다. 만약 프로젝트 주관기관의 핵심기술요소(CTEs)에 대한 기술성숙도를 정확히 평가하여, 그에 따른 개발기간과 일정의 영향 정도를 세밀히 분석한다면, 개발이 진행되는 과정에서 예산 추가와 일정 지연과 같은 위험을 최소화시킬 수 있다. 본 논문에서는 기술성숙도가 항공우주개발 프로젝트의 개발기간과 비용에 미치는 영향을 분석하고, 무기시스템 개발사업에 적용하여 개발기관의 기술성숙도 수준 차이에 따른 개발기간과 비용의 정량적인 변화를 분석하였다.

Key Words : TRL(Technology Readiness Level; 기술성숙도), TRA(TRL Assessment; 기술성숙도 평가), CTEs(Critical Technology Elements; 핵심기술요소), CCF(Cost Correction Factor; 비용보정계수), Regression Analysis(회귀분석)

1. 서 론

미 의회 예산회계국(GAO; Government Accountability Office)의 분석에 따르면 무기체계 개발 사업을

추진하는 동안에 예산 초과와 일정 지연과 같은 문제가 발생하는 원인은 대부분 사업을 착수하기 전에 기술적 준비수준을 제대로 검증하지 않았기 때문인 것으로 나타났다[1]. 실제로 사업이 중단된 사례 중에서 예산 초과인 경우에는 88%, 일정 지연인 경우에는 62% 정도가 사업을 착수할 당시에 핵심기술요소들의 기술성숙도(TRL; Technology Readiness Level)가 낮은 상태였다는 것이 지적되었다. 항공우주체계도 무기체계와 동일한 성격을 가지고 있으므로, 항공우주개발 프

† 2011년 11월 1일 접수 ~ 2012년 2월 6일 심사완료

* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

** 중신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
교신저자, E-mail : ykchang@kau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 항공대학교로 76

로젝트에 대해 분석한다면 이와 유사한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

기술성숙도가 개발기간과 비용에 지대한 영향을 미치기 때문에 개발 초기에 기술성숙도를 정확히 분석하고, 그에 따른 영향을 정확히 예측한다면 개발이 진행되는 과정에서 예산 초과와 일정 지연을 최소화시킬 수 있어 프로젝트의 개발 위험을 감소시키는 효과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 기술성숙도의 평가와 함께 기술성숙도가 개발기간 및 개발비용에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 특히, 무인기시스템 개발사업에 대해 이 분석결과를 적용하여 기술성숙도의 차이에 기인한 일정 지연과 비용 증가 영향을 정량적으로 분석하였다.

II. 기술성숙도(TRL)의 정의

TRL이란 특정 기술의 수준을 평가하거나, 서로 다른 유형의 기술성숙도를 일관되게 비교할 수 있도록 도와주는 체계적인 수단을 말한다[2].

실험환경과 실제 운용환경은 다르기 때문에 실험실에서의 성능이 실제 운용 시 동일하게 나타나지 못한다. 지상시험 시 이상 없이 작동된 시스템이더라도 운용환경에서 작동하지 않을 수도 있다. TRL은 이러한 환경 변화에 따른 기술성숙도에 대한 신뢰성 있는 평가기준이 될 수 있다. TRL은 1989년 미국 NASA Sadin 등이 최초로 7단계로 정의한 후, 1995년에는 표 1과 같이 9단계로 정의하였다[3].

표 1. TRL 수준별 정의[3]

TRL	단계 정의
9	임무 상황 하에서 기술이 최종적으로 적용된 것을 시현하는 단계
8	최종 형상과 조건에서 작동함이 증명된 기술단계
7	시제작된 시스템이 실제 운용환경에서 시현되는 단계
6	시제작된 시스템이 실제와 연관 있는 환경에서 시현되는 단계
5	기본 기술 요소들이 통합되어 함께 작동하는 것을 모된 환경이나 실제 환경과 유사한 수준에서 시현되는 단계
4	기술 기본 요소들이 통합되어 함께 작동하는 것을 연구실 환경 수준에서 시현하는 단계
3	해석적 연구와 이에 대한 물리적 검증을 위해 연구실 기반의 연구 수행 단계
2	관찰된 원리와 성질로 인해 실제적인 개념과 응용 기술이 발명되는 단계
1	기본적인 원리가 관찰되고 보고되는 단계

III. 개발기간 분석

기술성숙도에 따른 개발기간 분석은 다양하게 시도되고 있으며, 주로 기존의 데이터베이스를 기반으로 분석하여 정량화하는 방식으로 진행되고 있다.

1999년 SAIC의 Peisen 등은 항공기 기술을 운용준비 수준까지 성숙시키는데 요구되는 기간을 분석하였다[4]. 이 연구에서는 18개의 항공기 핵심 기술에 대해 초기 개념에서부터 상용제품의 생산까지 가는데 NASA에서 정의한 기술성숙도를 기반으로 얼마나 오랜 기간이 걸리는지 분석하였다.

표 2는 각 항공기 핵심기술에 대해 TRL 1로부터 차 상위의 TRL, 그리고 TRL 6까지 업그레이드하는데 요구되는 기간을 대표적으로 보여주고 있다.

또한 위성항법시스템(GPS; Global Positioning System)과 같은 주요 무기체계에 대한 미 국방부의 선택적획득보고서(SAR; Selective Acquisition Report) 데이터를 사용한 Malone, P 등의 연구 결과는 지상시스템, 임무장비 탑재 항공기, 미사일 시스템, 우주시스템 등 4개의 카테고리로 분류된 복합시스템의 기술성숙도 변화에 따른 개발 소요기간을 보여준다[5].

그림 1은 위의 4개의 카테고리에 대한 TRL 4(국방성 프로그램의 시작점)에서 TRL 8(초기 운용능력(IOC; Initial Operational Capability))까지의 개발 소요기간을 보여주고 있다.

위와 같은 기술성숙도에 따른 개발기간 분석은 특수한 분야에 한정되어 있으며, 다른 시스템에 일반적으로 적용하는 것은 쉽지 않다.

본 논문에서는 항공우주 프로젝트에 일반적으로 적용될 수 있는 개발기간에 대한 TRL 영향 분석을 수행하였다.

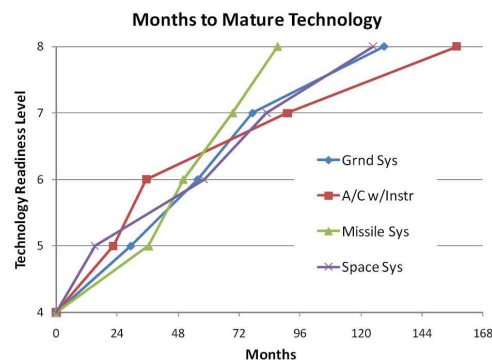


그림 1. 4개의 프로그램에서 TRL 4에서 TRL 8로 증진시키는 기간

표 2. 항공기 핵심기술요소의 TRL 증진을 위한 요구 기간

기술 명		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
TRL From	TRL To																		
1	2	0.4	0.5	0.5	5	0.5	1.5	3	2	2.5	1	0.5	2.5	2	3	0.3	0.8	0.7	1
2	3	0.4	0.5	0.5	1	0.5	1	1	2	1	1.5	1	1	4	1	0.3	0.3	0.2	1
3	4	0.4	1	0.5	3.5	0.5	1	1	2	1.5	1.5	1	7.5	2.5	1	0.4	0.3	0.2	1
4	5	0.5	1	0.5	1	3	1	1	2	2.5	1.5	1	4	3	1	2	0.35	0.2	2
5	6	0.2	1	1	0.5	0.5	1	22	2	1	6	1	1.5	0.5	2	2	0.35	0.2	4
기준 A		4	2	2	2	1	1	2	4	4	4	1	2	4	2	2	3	3	4
기준 B		1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
기준 C		2	3	2	3	3	3	3	3	1	3	2	1	3	6	6	1	2	3
기준 D		0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
기준 E		0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1
기준 F		0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0

A-탄소-6 열의 장막, B-전자 제빙 기술, C-엔지 모니터링 시스템, D-유동가시화, E-GA Wing, F-초임계 익(Supercritical Wing)
 G-Tiltrotor, H-Tribology, I-프로판 개발, J-섬유 성형, K-비파괴 평가, L-광신호 조종기술, M-입자영상유속계, N-Tailless Fighter, O-추력 벡터 노즐, P-Surface Movement Advisor, Q-Runway Groove, R-저배기 연소기,
 기준 A : 기술의 유형 : 1-기체(Airframe), 2-비행시스템(Flight Systems), 3-지상시스템(Ground Systems), 4-추진 시스템(Propulsion Systems)
 기준 B : 필요 보완기술(Enabling Technology Needed) : 0 - 해당사항 없음, 1 - 필요
 기준 C : 주목적/주이익(Primary Goal/Benefit) : 1 - 비용 감소, 2 - 안전, 3-성능
 기준 D : 주요 프로그램(Focused Program) : 0 - 해당사항 없음, 2 - 주요프로그램
 기준 E : 새로운 필요 생산품(New Product Needed) : 0 - 해당사항 없음, 2 - 주요프로그램
 기준 F : NASA 시험 : 0 - 수행되지 않음, 1 - 수행됨

3.1 상대적 일정 지연

기술적, 환경적 요인들로 인해 기술성숙도에 따른 절대적인 개발기간을 산정하기는 쉽지 않다. 하지만 기술성숙도를 증진시키는데 요구되는 상대적 개발기간을 예측하는 것은 가능하다.

Dubos, G 등은 28개 NASA 프로그램에 대한 상대적 일정 지연을 분석하여 기술성숙도와 일정 위험(SR; Schedule Risk)에 따른 상대적 일정 지연을 계산하였다[6].

상대적 일정 지연 R_s 는 초기 예상기간 D_i 와 최종기간 D_f 로 나타낼 수 있으며 계산은 다음 식 (1)과 같다.

$$R = \frac{D_f - D_i}{D_i} \times 100 \quad (1)$$

예를 들어, 초기 예상기간이 10개월이고, 최종기간이 13개월이라면 상대적 일정 지연은 다음 식 (2)와 같이 계산되며, 30%의 일정 지연이 발생했다고 할 수 있다.

$$R = \frac{13 - 10}{10} \times 100 = 30\% \quad (2)$$

다음 그림 2는 28개 NASA 프로그램에 대한 상대적인 일정 지연을 나타내고 있다.

NASA의 28개 프로그램의 기간을 분석한 결과, 프로그램 초기의 TRL이 4일 경우, 평균 약 78%

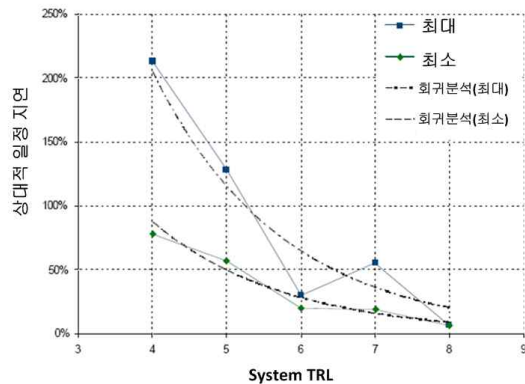


그림 2. 28개 NASA 프로그램에서 TRL에 따른 상대적 일정 지연

의 상대적 일정 지연이 발생하였고, 프로그램 초기의 TRL이 7일 경우, 평균 약 19%의 상대적 일정 지연이 발생하였다.

통상적으로 TRL 3이하에서는 시스템 개발을 수행할 수 없다고 판단하기 때문에 TRL 4 이상만을 고려하였으며, TRL 9일 경우에는 어떠한 일정 지연도 발생하지 않는다고 가정하여 TRL 8까지만을 고려하였다.

이를 기준으로 28개의 프로그램에 대하여 TRL 4부터 TRL 8까지의 통계자료를 바탕으로 회귀분석을 수행한 결과 다음과 같은 평균 상대적 일정 지연 방정식 식 (3)을 얻었으며, 그 결과는 그림

2에 함께 나타나있다.

$$\overline{R_s} = 8.29e^{-1.56 \times TRL} \quad (3)$$

상대적 평균 일정 지연은 전체 표본의 평균이기 때문에 실제의 상황을 고려한 통계분포를 이용해야 한다. 이는 추후에 정규분포를 이용하기 위함이다. 상대적 일정 지연 방정식은 상대적 평균 일정 지연 방정식에 일정한 배수를 곱하였으며 귀납적인 방법을 이용하여 회귀분석을 수행하였다. 회귀분석을 수행한 결과 약 2.5배를 해주는 것이 가장 높은 결정계수(R²; Coefficient of Determination)를 가졌으며 이를 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 이 결과 또한 그림 3에 함께 나타나있다.

$$\max(R_s) = 20.47e^{-0.56 \times TRL} \quad (4)$$

3.2 일정 위험

일정 위험은 앞서 설명한 정규분포를 이용하여 계산되며 일정 마진(SM; Schedule Margin)은 일정 위험에 따른 상대적 일정 지연 방정식을 바탕으로 계산된다. 일정 위험을 정규분포로 얻기 위해서는 평균과 표준편차를 알아야 한다. 하지만 정규분포의 평균과 표준편차가 제시되어 있지 않기 때문에 표본 분포를 바탕으로 정규분포를 추정해야 한다. 정규분포를 계산하기 위해서는 표본 평균과 표본 표준편차를 바탕으로 모평균과 모표준편차를 추정해야 하며, 이는 식 (5)와 (6)과 같이 계산된다.

$$\mu = \overline{R_{s,j}} \quad (5)$$

$$\sigma^2 \approx \frac{R_{s,j} - \max(R_{s,j})}{\text{Number of Sample}} = \frac{R_{s,j} - \max(R_{s,j})}{4} \quad (6)$$

표본 분산은 일정 위험에 대한 최대값에서 평균값을 뺀 값이며, 모표준편차는 표본 분산을 해당 TRL의 표본 수로 나누어 계산하였다.

위에서 계산한 모평균과 모표준편차를 바탕으로 다음 식 (7)과 같은 정규분포식을 구하여 일정 위험에 따른 상대적 일정 지연 또는 마진을 계산할 수 있다.

$$f(R_{s,j})_{j=TRL} = \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(R_{s,j} - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}} \quad (7)$$

각 TRL에 따라 정규분포의 계산이 가능하며 이에 따른 일정 위험 계산은 다음 식 (8)~(10)과

같이 수행된다.

$$SR|_{j=TRL} = 1 - P(R_{s,j} \leq sm_j) = 1 - P(Z \leq z) \quad (8)$$

$$= 1 - \Phi(z)$$

$$Z = \frac{R_{s,j} - \mu_j}{\sigma_j} \quad (9)$$

$$z = \frac{sm_j - \mu_j}{\sigma_j} \quad (10)$$

이를 바탕으로 계산한 기술성속도와 일정 위험에 대한 상대적 일정 지연 그래프는 다음 그림 3과 같다.

3.3 기술성속도 증진을 위한 기간

위에서 계산된 기술성속도와 일정 위험에 따른 상대적 일정 지연을 이용하여 역으로 기술성속도 증진을 위하여 요구되는 기간을 추정할 수 있다.

실제 초기에 주어진 개발기간이 t라면, 이에 대해 상대적 일정 지연으로 인해 추가로 소요되는 기간(t')을 다음 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t' = f(TRL, SR) = t(1 + R_{s,j}) \quad (11)$$

기술성속도에 관계없이 동일한 일정 위험을 가지고 있다고 가정하면, 기술성속도가 다를 경우 발생하는 기술성속도 증진을 위한 기간은 다음 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta t' = t'_m - t'_n = t(1 + R_{s,m}) - t(1 + R_{s,n}) \quad (12)$$

예를 들어, 초기 계획된 일정이 10년이고 일정 위험이 50%라고 가정하면 TRL이 4일 때는 일정 지연이 약 9년, TRL이 5일 때는 일정 지연이 약 5년 정도가 발생한다. 결과적으로 TRL 4일때 총

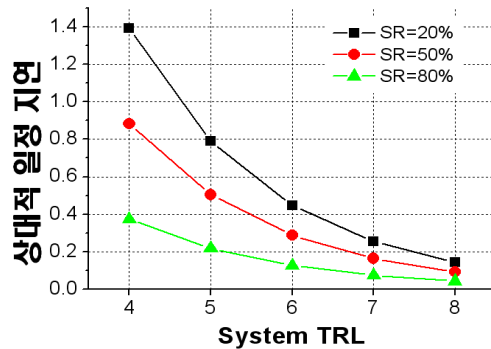


그림 3. TRL과 일정 위험에 따른 상대적 일정 지연

개발기간이 약 19년이고, TRL 5일 때 총 개발기간이 약 15년이다. 그러므로 TRL 4에서 TRL 5로 기술성숙도를 증진시키기 위한 기간이 약 4년이라고 추정할 수 있다.

정리하면 TRL n일 때의 상대적 일정 지연과 TRL m일 때의 상대적 일정 지연의 차를 이용하면 TRL m에서 TRL n으로 기술성숙도를 증진시키기 위해 요구되는 기간을 계산할 수 있다.

일정 위험이 20%, 50%, 80%일 때 하위 TRL에서 상위 TRL로 기술성숙도를 증진시키기 위해 요구되는 상대적 기간은 다음 표 3 ~ 5와 같다.

일정 위험에 따른 기술성숙도 증진을 위한 기간은 위와 같이 계산되었다. 하지만 시스템 수준의 개발 사업이나 세부계통, 기술에 대한 일정 위험을 확정적으로 결정하는 것은 쉽지 않다. 이러한 확정적 해법을 구하기 어려울 경우 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 확률분포로서 해법을 구하기도 한다. 본 논문에서는 각 서브시스템 또는 소요 기술의 일정에 대한 위험수준(RL; Risk

표 3. 일정 위험이 20%일 때 상위 TRL로 올리기 위한 상대적으로 요구되는 기간 (%)

TRL		Higher TRL			
		TRL 5	TRL 6	TRL 7	TRL 8
Low TRL	TRL 4	60.1	94.3	113.8	124.8
	TRL 5	-	34.2	53.6	64.6
	TRL 6	-	-	19.4	30.4
	TRL 7	-	-	-	11.0

표 4. 일정 위험이 50%일 때 상위 TRL로 올리기 위한 상대적으로 요구되는 기간 (%)

TRL		Higher TRL			
		TRL 5	TRL 6	TRL 7	TRL 8
Low TRL	TRL 4	37.8	59.5	71.8	78.9
	TRL 5	-	21.6	34.0	41.0
	TRL 6	-	-	12.3	19.4
	TRL 7	-	-	-	7.0

표 5. 일정 위험이 80%일 때 상위 TRL로 올리기 위한 상대적으로 요구되는 기간 (%)

TRL		Higher TRL			
		TRL 5	TRL 6	TRL 7	TRL 8
Low TRL	TRL 4	15.5	24.6	29.9	32.9
	TRL 5	-	9.0	14.4	17.5
	TRL 6	-	-	5.3	8.4
	TRL 7	-	-	-	3.1

표 6. 일정에 미치는 영향에 따른 위험수준

위험수준	평가기준
매우 낮음(0)	이미 동일한 과정을 통해 개발된 부품 및 장비가 널리 활용되고 있음
낮음(0.2)	기존의 개발과정을 다른 방법으로 응용함
다소 낮음(0.4)	기존의 개발과정을 조금 변화하여 적용함
보통(0.5)	기존의 개발과정을 많은 확장 및 변화를 통해 적용함
다소 높음(0.6)	흡사한 개발과정을 거친 경험을 바탕으로 새로운 체계를 구축하여 활용함
높음(0.8)	유사한 개발사례를 참고로 새로운 체계를 구축하여 활용하며 기간을 예상할 수 없음
매우 높음(1)	처음으로 개발되는 부품 및 장비이며 연구개발에 소요되는 기간을 예상할 수 없음

Level)을 분석하고, 이를 확률분포로 만든 후 Monte Carlo 시뮬레이션을 수행하여 전체 시스템이 갖는 일정 위험수준을 계산하였다. 여기서 계산되는 일정 위험수준은 앞서 기술한 일정 위험을 1에서 빼면 나오는 값으로 가정할 수 있다. 그 이유는 일정 위험수준이 낮을 때는 그만큼 일정 지연을 적게 할당할 수 있어 일정 위험이 높아지기 때문이다. 일정 위험수준을 평가하기 위해서는 다음 표 6과 같은 평가기준 표를 이용하며 이를 바탕으로 확률분포를 만들어 준다.

예를 들어, 어느 서브시스템에 대하여 일정 위험수준이 '다소 낮음'으로 평가되었다면 일정 위험수준은 0.4정도로 예측할 수 있다. 하지만 전체 시스템에 대한 일정 위험수준을 평가하기 위해서는 각 구성 서브시스템들의 일정 위험수준을 예측하여 종합적으로 추정해야한다. 이를 위해 Monte Carlo 시뮬레이션을 도입하였다. Monte Carlo 시뮬레이션은 확률분포를 바탕으로 수행되기 때문에 일정 위험수준에 따른 확률분포를 가지고 있어야 한다. 확률분포 모델은 분석을 수행하고자 하는 수행자에 의해서 선택된다. 대체적으로 정규분포, 베타분포 등이 확률분포모델로 많이 활용된다. 통계적으로 데이터를 획득할 수 없거나 계산의 간편성을 추구하는 경우에는 하나의 인자로 확률분포가 결정되는 삼각확률분포가

많이 이용된다. 위험에 대한 확률분포를 획득할 수 없는 경우, 삼각확률분포를 이용하여 위험에 대한 확률분포를 만들고, 이에 대해서 Monte Carlo Simulation을 수행하기도 한다.[7] 이로 인하여 본 논문에서는 삼각확률분포 모델을 사용했으며, 이는 다음 식 (13)과 (14)로 표현되며, a는 평가자에 의해 정해진 일정 위험수준 값이고, x는 확률변수로서의 일정 위험수준을 의미한다.

$$y = \frac{1}{2a}x \quad (0 < x < a) \tag{13}$$

$$y = \frac{1}{2(a-1)}(x-1) \quad (a < x < 1) \tag{14}$$

위의 예를 식 (13)과 (14)에 적용하면 다음 그림 4와 같은 위험 분포도를 그릴 수 있다.

이와 유사하게 모든 서브시스템의 위험 분포도를 구할 수 있으며, 각 서브시스템의 위험 분포도를 그림 5와 같이 Monte Carlo 시뮬레이션 방식으로 전체 시스템에 대한 위험 분포도를 계산할 수 있다.

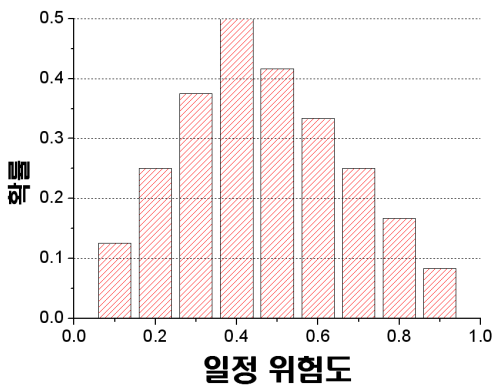


그림 4. 위험수준이 0.4일 때의 위험 분포도

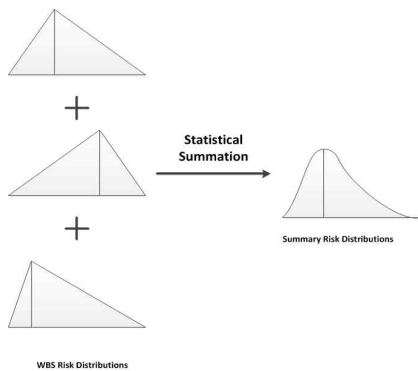


그림 5. 통계적 합산 과정 개념도

Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하여 나온 시스템 위험 분포도를 바탕으로 가장 높은 확률을 갖는 일정 위험수준을 선정하여 일정위험을 계산할 수 있다. 이와 같은 과정을 통해 기술성속도 증진을 위해 요구되는 상대적 기간을 확률적으로 계산할 수 있다.

IV. 개발비용 분석

일반적으로 대부분의 복합시스템 프로젝트에서 개발비용을 정확히 예측한다는 것은 쉽지 않다.

50년 이상 항공우주 프로젝트를 수행해온 NASA에서도 대부분의 프로젝트가 초기 예상비용을 초과하여 프로젝트 진행에 영향을 주는 경우가 빈번하게 발생해왔다.

다음 그림 6은 NASA의 29개 개발 프로젝트의 초기 예상비용과 실제 비용간의 상관관계를 분석한 결과를 나타낸 것이다.

NASA 프로젝트 관련 조사에 따르면 그림 6과 같이 14%만 예상비용 내에서 프로젝트를 마쳤으며, 53%는 최대 100%의 초과비용이 발생하였고, 33%는 100% 이상의 초과비용이 발생하였다는 것을 확인할 수 있다.

이처럼 개발비용을 근접하게 예측해야 프로그램의 위험을 최소화하고, 특히 기술성속도가 충분하지 않은 상황에서는 기술성속도 증가에 따른 개발비용 변화를 예측하고 실제 개발비용에 반영할 필요가 있다.

4.1 기술성속도 증진을 위한 비용

해외에서는 프로젝트의 개발비용에 관한 다양한 분석이 수행되고 있다. 그와 함께 기술성속도에 따른 개발비용에 관한 분석도 수행되고 있다.

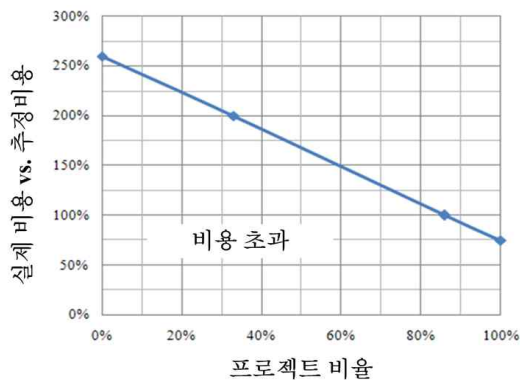


그림 6. NASA의 29개 개발 프로젝트의 개발비용 결과

본 논문에서는 기술성숙도에 따른 개발비용에 관한 부분만 분석하고자 한다.

Malone, P 등은 다수의 NASA와 국방부 항공우주프로젝트에 대한 개발비용 데이터를 바탕으로 기술성숙도에 대한 개발비용 예측을 위한 비용보정계수(CCF; Cost Correction Factor)를 추정하였다[5].

비용보정계수를 예측하기 위해 사용된 비용모델들은 기술개발 수준을 고려하여 만들어졌으며, 기술성숙도를 입력변수로 받아 그에 따른 예측비용을 결과 값으로 산출하였다. 이러한 여러 비용모델들을 통합하여 그림 8과 같이 나타내었으며, 각각의 비용모델들이 서로 유사한 추세를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 TRL 6을 기준으로 하여 상대적인 비용보정계수를 추정하였다.

각 비용모델들과 비용보정계수는 그림 7과 같다.

TRL 6일 때 계수의 값은 1을 나타내며, TRL이 6 이하일 때 계수 값이 증가하고, TRL이 6 이상일 때 계수 값이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

예를 들어, TRL 6에서 항공우주 프로젝트의 개발비용이 \$2.0M로 예측되었다면, TRL 4에서 동일한 프로젝트를 시작할 경우 비용보정계수를 통해 TRL 6에서의 개발비용의 1.5배인 \$3.0M의 개발비용이 요구되는 것이다.

이를 다시 정리하면, TRL이 4일 때 개발을 시작하게 되면 TRL이 6일 때 개발을 시작하는 경우보다 개발비용이 50% 증가하게 되는데, 이때 50% 증가한 비용이 TRL을 4에서 6으로 증진시키는 비용이라고 할 수 있다. 또한 TRL이 8일 때 개발을 시작하게 되면 TRL이 6일 때 개발을 시작하는 경우보다 개발비용이 30% 감소하게 되는데, 마찬가지로 30% 감소한 비용이 TRL을 6에서 8로 증진시키는 비용이라고 할 수 있다.

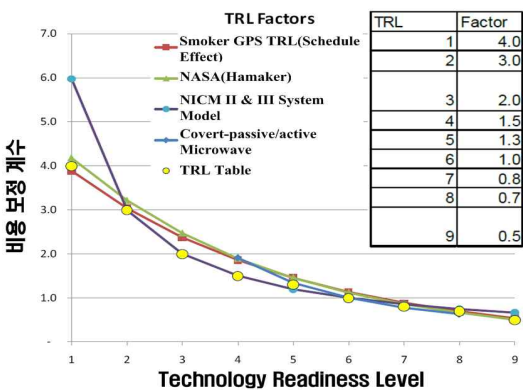


그림 7. 과거 데이터에 기반한 비용보정계수(CCF)

이와 같은 과정을 통해 기술성숙도 증진을 위해 요구되는 상대적 비용을 계산할 수 있다.

V. 무인기 개발사업에의 적용

앞에서 분석된 개발기간과 비용에 대한 기술성숙도의 영향을 이용하여 유사 사례에 적용하여 분석하였다.

무인기 개발사업에서 기술성숙도 수준이 서로 다른 A업체에서 B업체로 사업이 전환되었을 때의 개발기간과 비용에 대한 영향을 분석하였다. 즉 개발초기에 A업체를 기준으로 개발기간과 비용에 대한 추정이 완료된 상태에서 B업체로 전환되었을 때 개발기간과 비용에 얼마나 영향을 주는지 분석하였다. A업체에서 개발할 경우 개발기간은 60개월로 추정되었다. 이 프로젝트는 크게 6개의 서브시스템으로 분류되었으며, 각 서브시스템은 성능 및 운용 요구조건을 만족하는 핵심기술요소(CTEs)들을 포함한다. 핵심기술요소는 총 37가지로 분류하여 평가하였으며, 각 핵심기술요소에 대한 기술성숙도를 평가하여 6개의 서브시스템 별 TRL, 일정 위험수준, 비용을 다음 표 7과 같이 분석하였다.

기술성숙도는 A업체에 비해 B업체가 상대적으로 낮은 것으로 평가되었으며, 일정 위험수준은 두 업체가 동일한 것으로 평가되었다.

5.1 개발기간 분석

개발기간은 앞에서 분석하였듯이 기술성숙도와 일정 위험을 통해 계산될 수 있다. 일정 위험은 각 기술에 대한 일정 위험수준을 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 통합하여 그 값을 얻을 수 있다.

위의 표 5에서 각 서브시스템에 대한 일정 위험수준을 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 가장 높은 확률을 갖는 일정 위험수준을 얻었다. 이때 시뮬레이션 위해 적절 샘플수를 구해야 한다. 표 7에 의해서 획득한 서브시스템별 확률분포를

표 7. 각 서브시스템의 TRL, 위험수준, 비용

서브시스템	TRL		RL	비용(M\$)
	A	B		
서브시스템 1	6	4	0.5	36.0
서브시스템 2	6	5	0.6	13.0
서브시스템 3	6	4	0.5	10.0
서브시스템 4	6	5	0.6	12.0
서브시스템 5	6	6	0.5	10.0
서브시스템 6	6	5	0.5	13.0

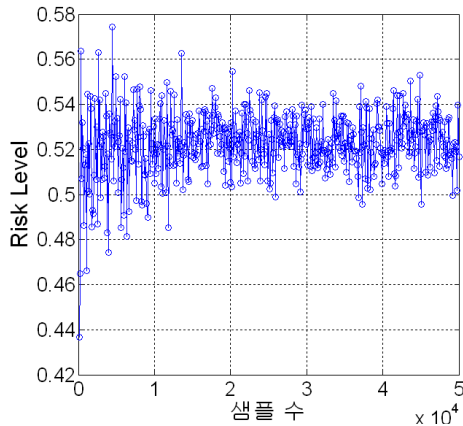


그림 8. 샘플 수에 따른 결과 값 수렴 여부

표 8. 개발기간 증가

Schedule Risk	TRL 5 → 6	TRL 4 → 6
0.4729	12 개월	34 개월

바탕으로 Monte Carlo 시뮬레이션의 샘플수를 구하기 위하여 시뮬레이션을 반복 수행해서 수렴 여부를 판단하였다. 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8로부터 약 15,000회를 수행하면 어느 정도 범위 내에 들어옴을 알 수 있다. 본 논문에서는 이 수렴 임계값보다 훨씬 많은 50,000회 정도를 수행하였다.

이렇게 계산된 최대 확률의 일정 위험수준은 0.5271이다. 실제 계산에 필요한 일정 위험값은 1에서 일정 위험수준을 빼서 계산되며, 그 값은 0.4729이다.

언어진 일정 위험을 이용하여 TRL 4에서 TRL 6, TRL 5에서 TRL 6으로 증진시키기 위한 일정을 추정하였다. 초기에 A업체에서 개발할 경우 개발기간을 60개월로 추정하였으며, 이를 기준으로 B업체에서 개발할 경우 증가되는 개발기간은 표 8과 같다.

결과적으로 프로젝트 주관을 A업체에서 B업체로 전환할 경우 초기 예상기간인 60개월에서 최소 72개월, 최대 94개월로 증가됨을 확인할 수 있다.

5.2 개발비용 분석

실제 개발비용에는 인건비, 시제비, 시험비 등 여러 항목들이 포함되어 있다. 시험비 등 기타 비용은 개발기간의 영향을 받지 않지만, 인건비의 경우 개발기간이 증가하면 인건비 예산 또한 증가되어야 할 것이다. 앞에서 분석한 개발기간

표 9. 개발기간에 따른 인건비 계산결과

개발 기간 (개월)	60	72	94
인건비 (M\$)	30	36	47

표 10. 개발비용 증가

서브시스템	A(M\$)	CCF	B(M\$)
서브시스템 1	36.0	1.5	54.0
서브시스템 2	13.0	1.3	16.9
서브시스템 3	10.0	1.5	15.0
서브시스템 4	12.0	1.3	15.6
서브시스템 5	10.0	1.0	10.0
서브시스템 6	13.0	1.3	16.9
합계	94.0		128.4

증가를 기준으로 인건비를 계산하면 표 9와 같다. 이때 개발에 참여하는 인원을 60명으로 가정하고, 1명당 연간 소요비용을 \$0.1M(1 억원)으로 가정하여 계산하였다.

1명당 연간 소모비용은 한국의 2010년 연구개발비와 참여연구원의 수를 바탕으로 계산되었다. 과학기술통계서비스에 따르면 2010년 연구개발비 중 약 39조 5,789억원이 경상비(인건비 + 기타 경상비)로 투자되었으며, 총 상근 참여연구원은 335,228명이었다[8]. 이를 통해 1인당 소요되는 비용이 약 1.2억원 정도가 되는데 이를 미화로 환산하면 약 \$0.1M 정도가 된다.

다음으로 A업체에서 B업체로 전환할 경우 B업체의 기술성속도가 낮기 때문에 기술성속도 증진을 위한 추가 비용이 소요된다. 각 서브시스템에 대한 비용 증가 계산은 표 10과 같다.

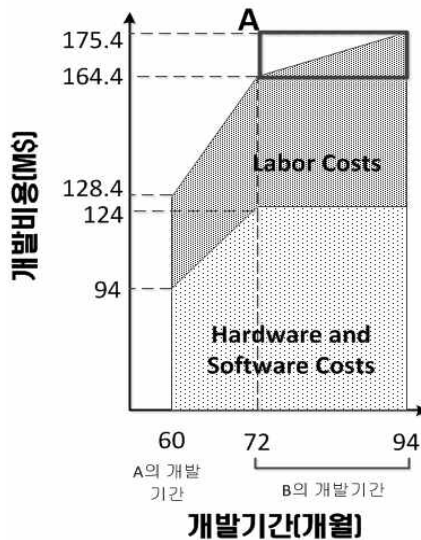


그림 9. 개발기간과 비용 그래프

각 분야에 대해 TRL 4에서 TRL 6, TRL 5에서 TRL 6으로 증진시키는 경우의 비용보정계수를 적용시켜 계산하였으며, 서브시스템 5의 경우 동일한 TRL을 가지고 있기 때문에 동일한 비용이 요구된다.

결과적으로 프로젝트 주관을 A업체에서 B업체로 전환할 경우 개발기간과 비용이 증가하게 된다. 이때 영향을 받는 인건비와 핵심기술요소 개발비용만을 고려하여 계산하면, 초기 예상비용인 \$124.0M에서 증가된 기간에 따라 최소 \$164.4M, 최대 \$175.4M로 증가됨을 확인할 수 있다. 이를 그래프로 나타내면 그림 9와 같다. 그림의 사각형 A는 A업체에서 B업체로 전환할 경우 요구되는 개발기간과 비용범위를 나타낸다.

V. 결 론

본 연구에서는 항공우주 프로젝트의 개발기간과 비용에 대한 기술성숙도 영향을 분석하였다. 기술성숙도에 대한 절대적인 영향을 분석하는 것은 현재로서는 쉽지 않기 때문에 상대적인 영향을 분석하였다.

기술성숙도를 증진시키기 위해 요구되는 추가 개발기간과 추가 개발비용에 대해 분석하였으며, 이를 통해 기술성숙도가 다른 경우 개발기간과 비용에 미치는 영향을 분석하였다.

결과적으로 일정 위험을 50%로 가정한다면 TRL 4에서 체계개발이 가능한 TRL 6으로 증진시키기 위해 개발기간은 약 60% 증가가 요구되며, 기술 개발비용은 약 50% 증가가 요구된다. 또한 TRL 5에서 TRL 6으로 증진시키기 위해 개

발기간은 약 22% 증가가 요구되며, 기술 개발비용은 약 30% 증가가 요구된다.

하지만 분석에 사용된 데이터베이스가 해외의 항공우주개발 프로그램 데이터이기 때문에 국내의 프로그램에 직접 적용하는 것은 오차가 존재할 수 있다.

참고문헌

- 1) DoD, "Defense Acquisition Guidebook", 2004.
- 2) DOE-EM, "Technology Readiness Assessment(TRA)/Technology Maturation Plan(TMP) Process Guide, pp.4~6, 2008.
- 3) GAO, "Best Practices-Better Management of Technology Development can Improve Weapon System Outcomes," GAO, USA.
- 4) Peisen, D. J., etc., "Case Studies: Time Required to Mature Aeronautic Technologies to Operational Readiness," Task Order 221, SAIC Report, Nov. 1999.
- 5) Malone, P., etc., "The Application of TRL Metrics to Existing Cost Prediction Models," IEEEAC Paper #1086, Version 3, Jan. 2011.
- 6) Dubos, G. F., etc., "Technology Readiness Level, Schedule Risk and Slippage in Spacecraft Design: Data Analysis and Modeling," AIAA SPACE 2007 Conference and Exposition, Long Beach, CA, Sep. 2007.
- 7) NASA, "NASA Cost Estimation Handbook", 2008.
- 8) 과학기술통계서비스, <http://sts.ntis.go.kr/index.jsp>.