

## 技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.6.576

## 발사체 개발의 연차별 비용 추정을 위한 비용모델 개발

김홍래\*, 유동서\*, 최종권\*, 장영근\*\*

## Cost Model for Annual Cost Spread Estimation of Space Launch Vehicle Development

Hong-Rae Kim\*, Dong-Seo Yoo\*, Jong-Kwon Choi\* and Young-Keun Chang\*\*

## ABSTRACT

In order to develop a launch vehicle successfully, it is important to estimate development costs accurately but it is also important to plan the annual budget. In this paper, the statistical method was utilized for cost spreading.

For cost spread modeling, the suitability of the model by analyzing several statistical models was evaluated and consequently, the beta-distribution model has been selected. In this study, the validity of the annual estimation cost model was verified through the comparison of the actual development cost distribution and the estimating cost distribution of Space Shuttle Main Engine. In addition, this paper estimated the annual budget required for the development of the KSLV-II using currently allocated cost for successful development. It is anticipated that the present cost spread model can be applied to not only launch vehicle development but also other large complex system development.

## 초 록

성공적인 발사체 개발을 위해서는 개발비용을 정확하게 추정하는 것도 중요하지만 연차별 예산 배분을 적절히 계획하는 것도 중요하다. 본 논문에서는 통계적 기법을 이용하여 개발기간 중 연차별 예산 배분에 대하여 분석하였다.

연차별 비용 모델링을 위해서 통계적 모델의 분석을 통해 적합성을 판단하여 베타분포 모델을 선택하였고, 프로젝트의 설계와 기술의 성숙도로 추정이 가능한 모델을 개발하였다. 연차별 비용 모델의 타당성을 검증하기 위하여 우주왕복선 주 엔진(Space Shuttle Main Engine)의 실제 개발비용 분포와 본 모델을 통한 개발비용 분포의 비교 연구를 통해 적합성을 확인하였다. 또한, 본 논문의 개발 비용 모델을 한국형발사체 개발에 적용하여 연차별 소요 비용을 추정하였다. 본 논문에서 제시하는 연차별 분포 모델은 발사체뿐만 아니라 다른 대형복합시스템의 개발에도 활용이 가능할 것으로 예상된다.

**Key Words** : Beta Distribution(베타분포), Annual Cost Spreading(연차별 비용 분배), Launch Vehicle(발사체), Cost Model(비용 모델), Cost Estimation(비용 추정)

† 2010년 9월 29일 접수 ~ 2011년 5월 27일 심사완료

\* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

\*\* 종신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과  
교신저자, E-mail : ykchang@kau.ac.kr  
경기도 고양시 덕양구 화전동 항공대길 100

## I. 서 론

우주발사체 개발은 전형적인 대형복합시스템 개발 사업으로 많은 개발비용과 인력을 필요로

하며 개발 기간도 상당히 길다. 따라서 개발에 따른 위험도 그만큼 클 수밖에 없다. 우주발사체의 개발 동향을 살펴보면 과거에는 비용에 상관없이 목표성능을 달성하기 위해 노력하였다면 최근에는 비용적인 측면을 중시하며, 개발비용의 최적화뿐만 아니라 생산 및 운용 비용의 최소화를 통해 발사체의 가격 경쟁력 확보에 초점을 두고 있다. 이러한 노력은 상업적 목적의 우주개발뿐만 아니라 과학적, 군사적 목적의 우주개발분야 전반에 걸쳐 요구되고 있다. 이런 추세에 따라 NASA, ESA에서도 비용공학(Cost Engineering)에 관심을 두고 많은 연구가 진행되고 있다.

비용공학을 적용하여 총 개발비용을 추정하는 것은 성공적인 발사체 개발을 위해 중요한 요소이다. 하지만 이런 총 개발비용을 추정하는 것뿐만 아니라 개발 기간 중에 예산을 집행하고 관리하는 것도 중요하다. 만약 예산이 제대로 집행되지 않는다면 집행 실패에 따른 개발비용 초과, 미흡한 지원에 따른 일정 연기와 같은 심각한 문제를 초래할 수 있으며 경우에 따라 개발이 실패할 가능성이 존재한다.

이런 사례는 선진국의 발사체 사업을 통해 쉽게 알 수 있다. ARIANE 5의 경우 잘못된 예산 계획과 기술적인 변화로 인하여 초과비용이 발생하고, 부족한 예산을 채우기 위해 ESA/CNES가 은행 자금을 빌리게 되었다. 이로 인하여 충분한 기술연구가 수행되지 않아 13개월 정도 개발이 연기되었다. 개발비용은 계획했던 64억 6900만 유로에서 8% 증액되어 5억 1800만 유로나 초과되었다[1]. 현재는 은행 이자로 인해 그보다 더 많은 비용이 초과되었을 것으로 예상하고 있다. Saturn V에 사용하려던 CENTAUR 경우, 원래 4년에서 5년 정도의 프로젝트로 계획되었다. 처음 개발 되는 수소 추진제를 이용함에도 불구하고 기술을 획득하기 위한 초기의 노력을 간과하였다. 그로 인해 개발 기간이 두 배로 늘어났고 비용초과도 발생했던 사례이다[1].

위와 같은 발사체뿐만 아니라 다른 대형 시스템에서도 이와 같은 비용 집행 실패 사례가 존재한다. 경부고속전철개발사업의 경우 11년이 지연되어 2010년 완공 예정이며 당초 계획된 5조 8,000억 원의 3배 이상 초과되었고, 인천신공항개발사업의 경우도 4년이 지연되어 완공되었으며 예산도 당초 3조 4천억 원의 2배가 투입되었다[2].

본 논문에서는 위의 사례와 같은 발사체 개발 집행 실패를 방지하기 위해 개발 초기 단계에서 예산 집행에 대한 계획 수립의 근거를 제공할 수

있는 비용모델을 제시하였다. 제시된 비용 모델은 기술 성숙도와 기술의 성숙도에 따라 분포 형태가 달라진다. 연차별 비용 분포 모델을 이용하기에 앞서 발사체의 총 개발비용의 예측이 선행되어야 한다. 본 연구팀에서는 개발비용 추정에 대한 연구를 수행하였고 연차별 비용 추정 모델은 개발 비용이 산정된 이후의 단계로 연구를 진행하였다[3][4].

개발된 연차별 비용 분포 추정 모델을 검증하기 위하여 SSME(Space Shuttle Main Engine) 사례를 이용하였다. 그리고 한국형발사체(KSLV-II)의 성공적인 개발을 위해 본 논문의 모델을 적용하여 비용 분포를 예측하였다.

## II. 본 론

### 2.1 연차별 비용 분포 모델을 위한 통계학적 분포의 선택

본 논문에 제시된 비용 분포 모델은 발사체의 연차별 예산 분포 형태가 반영된 분포 모델을 선정하기 위해 여러 통계분포를 고려하였다.

통계적으로 분석된 일정에 따른 최적 예산 분포 형태는 그림 1에 나타나 있다[1].

각 개발 연도에 따라 분포형태가 다르지만 대부분 개발 초기보다 개발 중후반(상세설계 단계)에서 많은 비용이 사용되는 형태를 가지고 있다. 그림 1에 제시된 형태는 최적프로파일에 해당하기 때문에 각 국가의 정치적, 경제적, 기술적 상황에 따라 그 형태가 변경될 수 있다.

그림 2는 SATURN V의 연차별 비용 분포를 최적 분포와 비교한 그래프이다. 최적 프로파일을 벗어나는 분포의 형태임을 알 수 있다.

그림 2의 형태를 보면 SATURN V의 연차별 비용 분포가 어떤 요인에 의해서 최적 프로파일

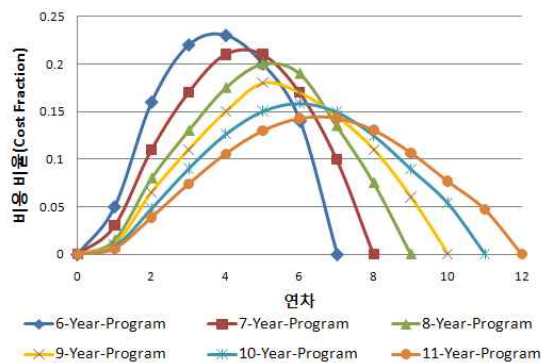


그림 1. 발사체 최적 예산 분포(%)[1]

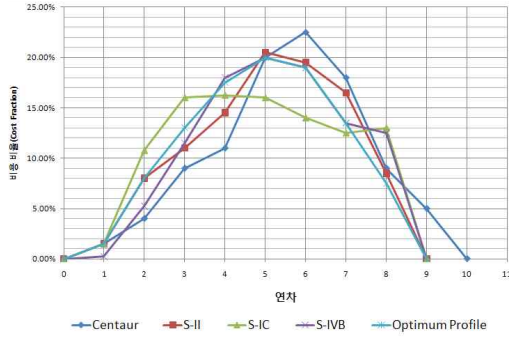


그림 2. SATURN V 프로젝트 연차별 비용 분포와 이상적인 연차별 비용 분포 비교(%)[1]

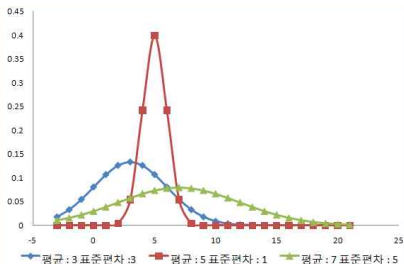


그림 3. 정규분포 곡선

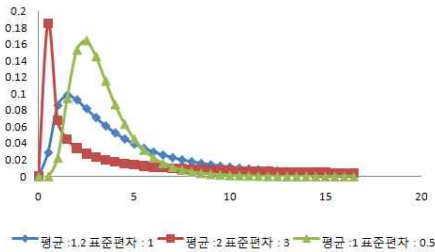


그림 4. 로그정규분포 곡선

과 다른 형태를 갖게 되었는지 알 수 있다. 최대 값의 위치가 개발기간의 중간 시점보다 앞에 있는 경우도 있고 뒤에 있는 경우도 있음을 확인할 수 있다. 연차별 비용 분포에 활용될 통계 분포 모델은 이런 다양한 분포 형태가 반영되어야 한다.

통계학에서 활용하고 있는 여러 분포 모델 중 정규분포(Normal Distribution), 로그정규분포(Lognormal Distribution), 베타분포(Beta Distribution)가 비용 분석에 대표적으로 사용되는 비용분포 모델이다. 그림 3과 같은 정규분포와 그림 4와 같은 로그정규분포의 경우 최대치의 위치를 유연하게 변경하지 못하기 때문에 다양한 비용 분포 형태를 표현하지 못한다.

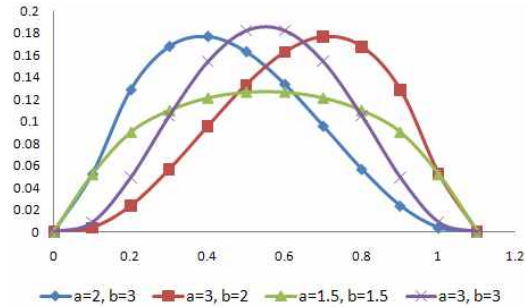


그림 5. 베타분포의 예

반면, 그림 5와 같은 베타분포의 경우 상당히 유연한 형태를 가지고 있어 앞서 요구된 분포 형태의 표현이 가능하다. 이런 이유로 인해 베타분포는 연차별 비용 분포 모델로 사용하기 적합하다.

### 2.2 해외의 연차별 비용 분포 모델

연차별 분포 모델에 대한 연구는 1960년대 JSC(Johnson Space Center)에서 연구가 수행된 사례가 있다. 이 연구는 미국에서 실제 수행된 다수의 R&D 프로그램의 비용 분포를 바탕으로 연차별 비용 분포 추정 모델을 개발하기 위한 것이었다[3]. JSC에서는 베타분포(식 (8))를 식 (1)과 같은 다항식으로 근사하여 비용 분포 추정 모델을 개발하였다. 개발된 연차별 비용 분포 모델은 NASA Cost Engineering Handbook에 제시되어 있으며, 매개변수로 비용 추정이 가능하도록 하였다[5]. 베타 분포의 누적 확률 분포는 식 (1)과 같이 나타낸다. 이를 비용 분포로서 사용하려면 식 (1)에 전체 개발 비용을 곱해야 한다.

$$F(S_n) = A[10 + S_n((15 - 4S_n)S_n - 20)]S_n + B[10 + S_n((6S_n - 15)]S_n + [1 - (A + B)](5 - 4S_n)S_n^4 \quad (1)$$

식 (1)에서 F는 0과 1 사이의 값을 가지며 총 개발비용 중 S까지 사용된 비용의 비로 표현된다. S<sub>n</sub>는 0과 1사이의 값으로 일정 진행 정도를 나타내며, n은 해당 연도의 차수이다. 분포의 형태는 A와 B에 의해 결정된다. A와 B는 뺄셈 정도(P)와 개발기간 중간 지점까지의 개발비용 소모 정도(C)에 의해서 결정되며 F, S, A, B, P, C 모두 무차원 수이다.

다음 식은 A, B와 P, C 사이의 관계를 나타낸 식이다. A, B, P는 0에서 1사이의 값을 C는 0.1875에서 0.8125사이의 값을 갖는다.

i) C가 0.5보다 작을 때,

$$A = \frac{(1-P)(C-0.1875)}{0.625} \quad (2)$$

$$B = \frac{P(C-0.1875)}{0.3125} \quad (3)$$

ii) C가 0.5보다 클 때

$$A = \frac{P \times (C-0.8125) + (C-0.1875)}{0.625} \quad (4)$$

$$B = \frac{P(0.8125 - C)}{0.3125} \quad (5)$$

위 식으로 그림 6과 같은 몇 가지 분포 형태를 그릴 수 있다. 누적 분포 F(S)가 아닌 각 연도에 요구되는 비용 f(S)는 다음 식 (6), (7)과 같다.

$$f(S_1) = F(S_1) \quad (6)$$

$$f(S_n) = F(S_n) - F(S_{n-1}) \quad (n \geq 2) \quad (7)$$

위의 그림 1에서 C가 0.8125와 같이 초반에 비용이 많이 사용되는 경우에는 기술 연구와 공학적인 설계에 대한 비용 분포 형태를 나타낸다. C가 0.5일 때는 제작과 생산 비용의 분포 형태를 나타낸다. C가 0.1875와 같은 후반부에 많은 비용이 소모되는 경우에는 인증 시험과 같은 각종 시험과 관련된 비용 분포에서 나타나는 형태이다 [5]. SSCM에서는 이를 바탕으로 사용자가 임의로 P, C를 입력하도록 개발되었다[6].

JSC에서 개발한 연차별 비용 분포 모델은 Wynholds, Skratte에 의해서 국방 무기 프로그램에 대한 적용되었으며[7], Aerospace사에서 개발한 SSCM(Small Satellite Cost Model)에도 사용되고 있다[6].

식의 개발 로직에 대해서는 공개되지 않았고, 변수 C와 P를 결정하는데 있어서 비용계획이 잡혀 있지 않으면 상당히 주관적으로 결정되는 변수들이고 P와 같은 경우 NASA에서는 자세한 정의를 제공하고 있지 않다. 게다가 실제 베타분포

가 JSC에서 제공하는 모델보다 좀 더 유연한 형태를 가지고 있어 본 논문에서는 JSC에서 제공하는 연차별 비용 모델을 이용하지 않고 실제 베타분포 모델을 이용하였다.

### 2.3 매개변수의 선정

앞서 소개한 JSC의 비용 분포모델의 경우, 사용자의 판단을 위한 자세한 지표를 주지 않아 사용자에게 따라 비용 추정이 주관적으로 수행되며 부정확성을 내포하고 있다. 본 논문은 이런 부정확성을 줄이고자 식 (6)과 같은 실제 베타분포를 이용하고 사용자에게 비용 추정에 대한 지표를 주어 보다 객관적인 비용 모델을 제시하였다.

베타분포는 다음 식 (8)과 같은 누적분포 식을 가지고 있다. 두 개의 변수 a, b에 의해서 모양이 결정된다[8]. 이에, 베타 분포를 기본 모델로 사용한 본 논문의 연차별 비용 모델은 두 개의 매개변수와 a, b와 연결시켰다.

$$F(x) = \frac{\int_0^x x^{a-1}(1-x)^{b-1}dx}{\int_0^1 x^{a-1}(1-x)^{b-1}dx} \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (8)$$

그림 5와 같이 위의 식 (8)에서 a가 b보다 클수록 x의 범위의 중간보다 뒤에서 최대값을 갖고 b가 a보다 크면 앞에서 최대값을 갖는다. 그리고 a와 b의 합이 클수록 뾰족한 모양을 갖고 합이 작으면 평평한 형태를 갖게 된다[8].

비용 분포에 크게 영향을 주는 요소로는 기술의 성숙도, 설계의 성숙도, 타부품과의 연관성, 일정연기의 가능성 등이 있다. 이러한 변수 중 전체 개발 비용과 일정연기에 영향을 주는 타부품과의 연관성과 일정연기를 가능성을 제외하였다. 추가적으로 JSC에서 제시한 비용 분포 모델의 예를 감안하여 기술의 성숙도, 설계의 성숙도를 매개변수로 택하였다. 이에 대한 지표는 미국 방성(DoD)의 기술 준비 수준(TRL; Technology Readiness Level)[9]과 NASA에서 위험 평가에 이용되는 설계의 성숙도(Design Maturity)를 매개변수로 선정하였다. 기술 준비 수준은 미국 정부와 다수의 세계적 기업들이 시스템 또는 서브시스템의 기술과 설계 준비상태를 평가하기 위하여 도입하였다. 이 지표는 총 개발비용을 추정하기 위해 사용되기도 한다.

기술 준비 수준으로 평가되는 기술 성숙도가 낮을수록 기술을 습득하기 위해 초반에 많은 비용이 소모되며, 설계의 성숙도가 낮을수록 후반에 많은 시험이 진행되어야 한다는 측면에서 베타

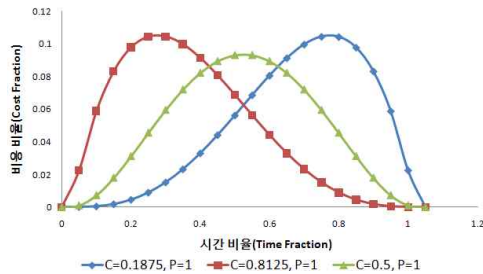


그림 6. JSC 분포 모델의 예

타분포의 변수  $a, b$ 의 경향과 유사하다. 기술 성숙도를 베타분포의  $a$ , 설계의 성숙도를  $b$ 로 선택하였다.

**2.4 연차별 비용 분포 모델 개발**

비용모델을 개발하기 위해서는 매개변수를 선택하여 회귀분석을 수행해야 한다. 이를 위해서는 잘 구축된 데이터베이스를 바탕으로 식을 개발해야 한다. 하지만 발사체 개발에 성공한 나라는 9개국으로 국한되어 있고 자료 등이 교류되지 않아 기술과 비용 데이터 등을 획득하기 어렵다. 이 때문에 데이터베이스를 이용한 추세식이 아닌 그림 7과 같은 추세를 반영하는 방법을 선택하였다.

이를 위해 앞서 두 가지 변수를 선택하였고, 이를 베타분포의 성질과 연결시켰다. 다음 그림 7은 그간 수행된 다양한 우주개발 프로젝트를 NASA에서 조사하여 일반적인 연차별 비용 분포 형태로 나타낸 것이다.

현존하는 설계를 활용하나 기술의 연구가 추가적으로 요구되는 경우 기술을 획득하기 위해 상대적으로 초반에 많은 비용이 소모되며(그림 7, Curve 1), 개발 모델을 통해 성능 및 인증 시험을 거쳤으며 현존하는 부품 및 장치의 성능을 개선하기 위해 추가설계만 필요한 경우라면 개발 중반에 많은 비용이 소모되며(그림 7, Curve 2), 과학적 연구도 필요하며 그에 따른 새로운 설계가 필요한 경우 개발 전체적으로 고루 분포되어 소모되며 (그림 7, Curve 3), 기술은 확보되었으나 현존하는 설계가 존재하지 않는 경우 상대적으로 후반에 많은 비용이 소모된다(그림 7, Curve 4)[4].

이런 경향을 매개 변수로 반영하기 위해서 변수의 상한과 하한을 정해야 한다. 베타분포는  $a$  또는  $b$ 가 1 이하로 되면 그림 8과 같이 분포 형태가 바뀌는 특징을 가지고 있다. 이 때문에 하한은  $a$ 와  $b$ 를 각각 1보다 큰 수로 정하였다.

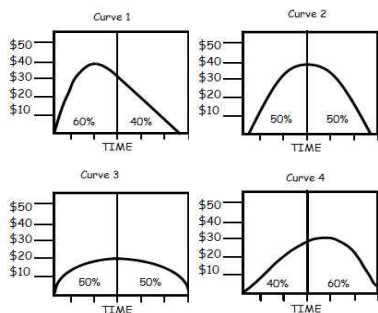


그림 7. 일반적인 비용 분포 형태

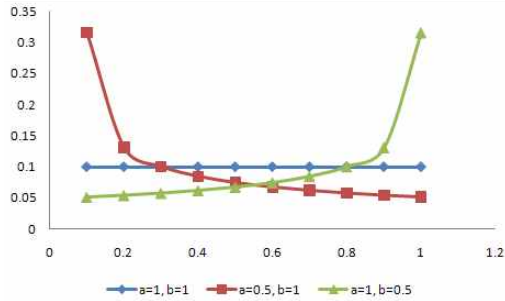


그림 8.  $a, b$ 가 1 이하인 경우 베타분포의 형태

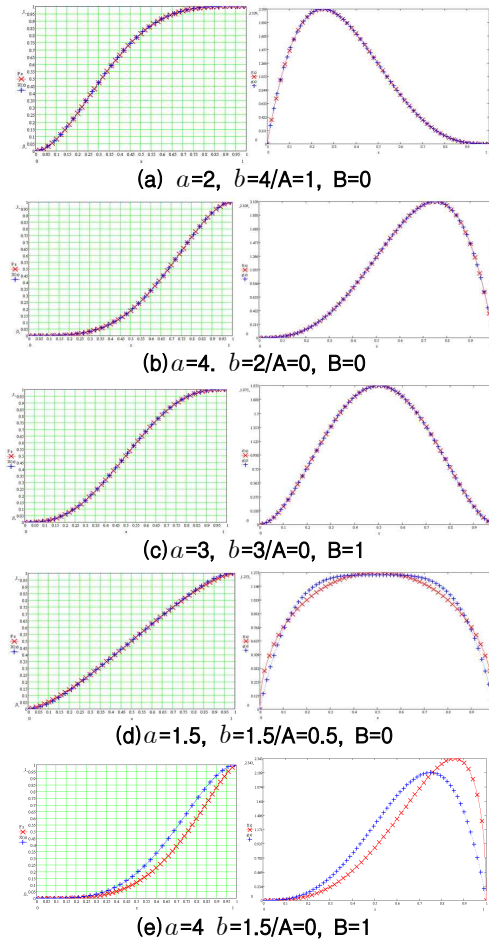


그림 9. 귀납적 비교 예(X:베타분포, +:JSC 분포)  
( $a, b$ -베타분포, A, B-JSC 분포 모델)  
(x축-일정 비율, y축-비용 비율)

좀 더 정확한 상한과 하한은 그림 9와 같이 JSC의 연차별 비용 모델과 본 논문에서 제시한 베타분포 모델의 귀납적 분석을 통하여 상한과 하한을 결정하였다.

귀납법적 비교 분석을 통해  $a, b$ 는 1.5와 4 사이의 값을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 그림 9에 (e)와 같이  $a$ 와  $b$ 가 각각 4, 1.5일 때의 비용의 분포 형태가 JSC에서 제시한 18.75% 이하였으며,  $a$ 와  $b$ 가 각각 1.5, 4일 때도 JSC에서 제시한 상한인 81.25%를 넘었다. 그렇기 때문에 JSC의 연차별 비용 추정 모델과 가장 유사한 형태를 갖도록 상한과 하한을 3과 1.5로 정하였다. 이에 중간 지점까지 소모된 비용을 21.6%에서 78.4% 사이의 범위를 갖게 되어 JSC의 비용 분포 형태가 반영되었다.

$$F(0.5) = \frac{\int_0^{0.5} x^{1.5-1}(1-x)^{3-1}dx}{\int_0^1 x^{1.5-1}(1-x)^{3-1}dx} = 0.784 \quad (9)$$

$$F(0.5) = \frac{\int_0^{0.5} x^{3-1}(1-x)^{1.5-1}dx}{\int_0^1 x^{3-1}(1-x)^{1.5-1}dx} = 0.216 \quad (10)$$

기술의 성숙도와 설계의 성숙도를 각각  $a, b$ 로 정의하였다. DoD에서 제시한 총 9가지의 TRL 항목과 설계의 성숙도를 7가지로 선형적으로 분류하여  $a, b$ 를 등간격으로 잡아 적절히 대응시켰다. 그 결과는 표 1, 2와 같다. TRL의 경우 미 공군 연구소(AFRL)에서 제공하는 TRL Calculator를 이용하면 보다 쉽게 기술의 성숙도를 평가할 수 있다[10].

표 1. 응용되는 기술의 성숙도

TRL 레벨	설명	$a$
9	장비는 현재 사용되고 있음	3
8~7	장비가 현재 제한된 생산단계이며 요구되는 모든 승인과정을 성공적으로 마침	2.75
6	Prototype이 현재 인증시험을 거치고 있으며 성능요구조건을 만족했음	2.5
5	엔지니어링 모델 개발되어 성능 및 인증 시험을 거쳤음	2.25
4	엔지니어링 모델을 통해 주요 기능이 시험되었음	2
3	기능 및 인증에 대해 만족하는 개념설계가 완료되었음	1.75
2~1	과학적 연구가 필요하거나 현재 진행 중임	1.5

표 2. 응용되는 설계의 성숙도

설명	$b$
현재 사용되고 있는 부품 및 장치 설계임	3
현재 사용되는 부품 및 장치를 다른 용도로 활용함	2.75
현존하는 부품 및 장치의 성능 내에서의 간단한 재설계가 필요함	2.5
현존하는 부품 및 장치의 성능을 개선하기 위한 추가설계가 필요함	2.25
현존하는 설계를 활용하는 설계개발이 필요함	2
현존하는 설계를 기반으로 하여 많은 설계개발 노력이 필요함	1.75
대체 부품 및 장치가 없음 / 새로운 신기술 및 설계가 요구됨	1.5

본 논문에서 제시한 표 1, 표 2와 베타누적분포 식 (6)을 결합하여 연차별 비용 추정이 가능한 모델을 개발하였다. 실제 비용을 계산하기 위해서는 식 (11), (12), (13)과 같은 추가 계산과정이 필요하다. 베타 누적 분포를 이용한 연차별 비용 누적 분포 모델은 다음 식 (11)과 같다.

$$F_C(x) = (\text{개발비용}) \times F(x) \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (11)$$

위 누적 분포 식 (11)은 식 (12), (13)과 같이 연도별 비용 분포  $f_C(x)$ 를 표현할 수 있다.

$$f_C(x_1) = F_C(x_1) \quad (12)$$

$$f_C(x_n) = F_C(x_n) - F_C(x_{n-1}) \quad (13)$$

$n$ 이 1일 때를 1차 년도로 할 때,  $x_n$ 은 총 개발기간에서 해당 차년도의 비이다. 여기서의  $x$ 는 시간을 나타내며 해당하는 차년을 총 개발기간으로 나누어 표현한 값이며 0과 1사이 값을 갖는다. 예를 들어, 개발기간이 10년인 프로젝트에서 2차 년도라면  $x$ 는 0.2로 표현이 가능하다.

본 논문의 연차별 비용 모델은 불변비용(Constant Cost)으로 계산되어야 한다. 불변비용으로 비용 분포가 계산되어야 시간에 따른 비용 상승 인자를 고려하여 정확한 비용분포를 추정할 수 있기 때문이다.

개념설계 단계에서는 그림 10과 같은 시스템 수준에서 개발비용과 기술, 설계의 성숙도를 평가하여 연차별 비용을 추정할 수 있다.



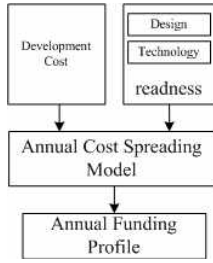


그림 10. 연차별 비용 추정 개념도

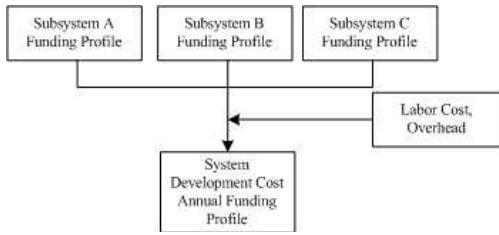


그림 11. Bottom-up 방식의 연차별 비용 추정 개념도

또한 점차 설계 단계가 진행됨에 따라 WBS(Work Breakdown Structure) 혹은 PBS(Product Breakdown Structure)가 작성되어 세부적으로 분류가 된다면 그림 11과 같이 각 서브시스템수준에서 연차별 비용을 추정하는 Bottom-up 방식의 연차별 비용 추정이 가능하다. 추정된 서브시스템 연차별 비용을 합하면 총 개발비용의 연차별 비용 추정이 가능할 것이다. 하지만 PBS를 통한 Bottom-up 방식의 추정을 활용할 때에는 Subsystem의 개발비용만을 고려하기 때문에 개발 인원을 고려한 인건비와 간접비(Overhead)를 따로 고려하여 추정하여야 보다 정확한 연차별 비용 분포 형태를 얻을 수 있을 것이다.

2.5 연차별 비용 모델의 검증

개발된 비용모델의 타당성을 얻기 위해서는 비용모델에 대한 검증이 필요하다. 본 논문에서 소개된 연차별 비용 모델을 Space Shuttle Main Engine(SSME) 개발 과정의 실제 예산 집행 결과를 이용하여 검증하였다.

SSME은 1972년부터 1982년까지 총 11년 동안 개발되었으며 총 개발비용은 18,146 MYr(Man Year)이 소요되었다. MYr는 1년간 1인에 들어간 연구 개발비용을 말한다. 이 비용에는 경영, 마케팅 등 기타 추가적인 간접 경비 모두가 포함된 다. 또한 MYr 수치는 총 산업 프로젝트 비용을 참여 인원의 수로 나누어 얻는다. 특별한 경우에는 하청계약을 제외한 총 연간 거래액을 경영이

나 관리 인원을 빼 엔지니어의 수로 나눈 값으로 정의된다[11].

MYr의 단위는 시간에 독립적인 단위로 불변 비용에 해당하며, 통계자료를 이용하여 매해 1 MYr당 실제비용을 예측할 수 있다.

SSME에 적용되는 액체 엔진 기술은 처음 도입되는 것이라 기술 성숙도를 1.5로 선정하고 액체 엔진 설계는 경험이 있으나 많은 개발 노력을 요구했기 때문에 설계 성숙도는 1.75로 선정하였다. 두 개의 값을 이용한 SSME의 연차별 비용 모델의 분포는 다음 식 (14)와 같다.

$$F(x) = \frac{\int_0^x x^{1.75}(1-x)^{1.5} dx}{\int_0^1 x^{1.75}(1-x)^{1.5} dx} \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (14)$$

SSME는 총 11년의 개발 기간을 가지므로 x는 0부터 매년 1/11씩 증가시켜서 연차별 비용을 산정할 수 있다. 본 연차별 비용 모델을 이용한 SSME의 예측된 비용분포와 실제 집행된 예산 분포를 아래 표 3, 그림 12에 비교하였다.

표 3. SSME 연차별 예산 분포 수치[1]

연도	모델(MYr)	실제(MYr)
1972	439	1023
1973	1094	820
1974	1513	1018
1975	1799	1597
1976	2015	2590
1977	2187	2528
1978	2304	2472
1979	2317	2005
1980	2140	1530
1981	1651	1357
1982	687	1206

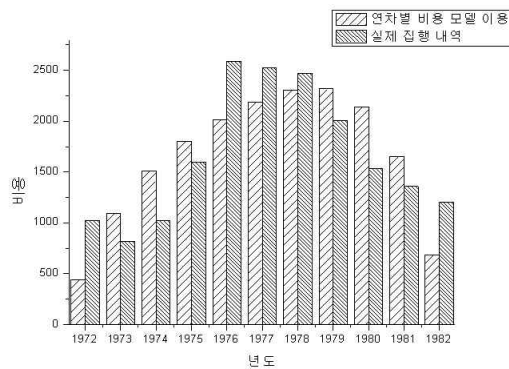


그림 12. SSME 연차별 예산 분포 (MYr)

실제 SSME는 개발기간이 9년으로 계획되었다. 하지만 건조 질량이 초기 3,010 kg에서 3,180 kg로 변경되었고 2, 3, 4차 년도에 기술연구를 위한 충분한 예산을 지원받지 못하면서 2년이 지연되어 11년만에 개발이 완료되었다.

본 논문에서 제시한 연차별 비용 모델로 산출한 SSME의 연차별 비용과 실제 SSME의 개발비용 분포를 비교해 보면 비교적 유사한 형태지만 2, 3, 4차 년도의 실제 개발비용보다 연차별 비용 모델로 예측된 비용이 높음을 알 수 있다. 이는 2, 3, 4차 년도에 실제 개발비용이 충분히 집행되지 못했음을 의미한다. 또한 5차년도 예산이 전년도에 비해 크게 상승하였는데 이는 2, 3, 4차 년도에 비용이 더 요구되었음을 의미한다. 만약 SSME의 예산이 전반부에 적합하게 집행되었다면 일정 지연과 비용초과를 방지할 수 있었을 것이다.

실제 개발비용의 예산 집행은 당시의 사회적, 정치적, 경제적 여러 요소에 의하여 영향을 받기 때문에 개발 초기에 예산 편성을 하더라도 개발 과정 중에 유동적으로 변경될 가능성을 염두에 두어야 한다. 그럼에도 적절한 연차별 예산 편성은 성공적인 개발 과정을 위해서라도 반드시 필요한 절차이다. 위 사례를 통해서 본 논문에서 제시한 연차별 비용 모델이 타당성을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

### 2.6 한국형발사체 개발비용에 적용

본 논문에서 연구한 연차별 비용 분포 모델은 궁극적으로 발사체 개발에 적용하기 위함이다. 그렇기 때문에 본 논문에서는 2010년부터 진행될 한국형 발사체에 연차별 비용 분포 모델을 적용해 보았다.

한국형발사체의 예산은 2010년 1조 6,250억 원으로 책정되어 있으며 현재 시스템설계단계에 있다. 한국의 발사체 설계 경험은 KSLV-I의 개발을 통해 임무설계, 제어, 전자 탑재, 열/공력, 체계 종합과 같은 분야에서는 부분적으로 설계를 획득했지만 한국형발사체의 성공을 크게 좌우할 액체 엔진의 기술과 설계는 확보되지 않았다. 게다가 현재 한국형발사체를 위한 액체 엔진의 경우에는 30톤 급 액체 엔진이 개별 부품수준에서 개발이 완료된 상태라 요구되는 75톤 급 액체 엔진 기술을 확보하고 있지 않아 기술 성숙도는 매우 낮다고 할 수 있다. 그리고 현존하는 30톤 급 액체 엔진의 설계를 기반으로 하여 많은 설계가 요구되므로 설계의 성숙도는 낮다고 볼 수 있다. 표 1, 2에 따라 표 4와 같은 점수를 줄 수 있으며식 (15)에 의해 다음 표 5와 그림 13과 같은 비용추정 결과를 얻게 된다.

표 4. 한국형발사체의 설계 및 기술 성숙도

설계 성숙도	기술 성숙도
1.75	1.5

$$F(x) = \frac{\int_0^x x^{1.75}(1-x)^{1.5} dx}{\int_0^1 x^{1.75}(1-x)^{1.5} dx} \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (15)$$

표 5. 연차별 비용 추정 결과(억 원)

연도	누적 분포	연차별 비용 추정
2010	425	425
2011	1,384	959
2012	2,718	1,334
2013	4,332	1,614
2014	6,147	1,815
2015	8,088	1,941
2016	10,078	1,990
2017	12,031	1,953
2018	13,842	1,811
2019	15,361	1,519
2020	16,250	889
총합		16,250

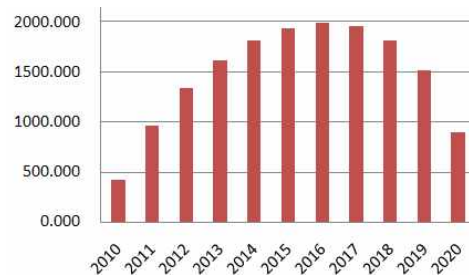


그림 13. 연차별 비용 추정 분포도 (억 원)

한국형발사체의 개발비용은 2013년부터 2018년까지 상세설계단계에서 가장 많은 비용이 소요될 것으로 추정되었다.

본 논문에서 추정 방식은 시스템 수준에서 비용추정을 하는 Top-down 방식이다. 차후 설계가 진행됨에 따라 WBS, PBS가 세부적으로 작성되면 서브시스템별 추정된 개발비용을 그림 9와 같은 Bottom-up 방식으로 추정 가능하다. 불변비용으로 추정된 비용분포에 불가상승률을 고려한다면 보다 정확한 연차별 비용 분포를 얻을 수 있을 것이다.

### III. 결 론

발사체와 같이 많은 노력과 긴 개발기간을 요구하는 사업은 초기에 정확한 예산을 수립하는



것이 매우 중요하지만, 그 뿐만 아니라 각 해에 필요한 노력을 예측하여 일정 연기와 비용 초과를 방지하는 것도 중요하다. 이를 위해 본 논문에서 기술 성숙도와 설계 성숙도를 바탕으로 개발기간 동안 요구되는 비용의 근거를 제공할 수 있는 연차별 비용 분포 모델을 제시하였다.

본 논문에서 제시한 연차별 비용 모델은 과거 JSC에서 연구된 연차별 비용 모델을 바탕으로 실제 배타분포를 이용을 하여 개발하였다. JSC에서 제시한 연차별 비용 모델과 다르게 기술 수준을 나타내는 TRL(Technology Readiness Level)과 현존하는 설계의 존재 유무를 나타내는 설계의 성숙도를 매개변수로 선택하여 비용 분포에 적용하였으며, 이를 통해 보다 정확한 예산 배분이 가능하도록 하였다. 이렇게 개발된 연차별 비용 추정 모델은 SSME의 실제 예산 분포의 비교를 통해 필요한 비용의 예측이 가능함을 확인하였다. 또한 개발된 모델을 현재의 한국의 기술과 설계수준을 감안하여 한국형발사체에 적용해 보았다.

추후 본 논문에서 제시한 연차별 비용 추정 모델은 불변 비용(Constant Cost)으로 추정되기 때문에 실질 비용(Real Cost)으로 환원해줄 여러 요소들을 고려해야 한다. 예를 들어, 화폐의 가치 변화, 물가상승 등과 같은 요소들을 예측해서 적용해야 한다. 이런 요소를 고려해 준다면 장기프로젝트에서 많이 나타나는 인플레이션에 의한 초과비용을 방지하여 성공적인 사업 수행이 가능할 것이다.

마지막으로 본 논문에서 제시한 발사체 연차별 비용 분포 모델은 발사체와 설계 과정이 유사한 항공기, 군사 시스템, 위성 등과 같은 대형복합시스템 개발 사업에 적극 활용될 수 있을 것으로 전망한다.

또한, 장기적으로 여러 대형 시스템 개발 프로젝트의 비용 자료를 획득하여 본 논문의 연차별 비용 모델의 매개변수 조절이 필요하다. 추후에도 비용 집행 자료를 획득하여 추가 매개변수 연구가 수행될 것이며 그 결과는 추후 논문에서 계속 다루어질 것이다.

## 후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 우주기초원천기술 개발 사업으로 수행된 연구입니다.

## 참고문헌

- 1) D.Koelle, Handbook of Cost Engineering For Space Transportation Systems, TransCostSystems, 2010, pp. 87~101.
- 2) 유일상, 조광래, "KSLV-1 사업을 위한 위험 관리 프로세스 개발", 산업경영시스템학회지, Vol. 29, No. 1, 2006, pp. 94~100.
- 3) "발사체 개발비용 산정 및 평가모델 개발", 2009-0094086, 교육과학기술부, 2009.
- 4) "한국에서의 발사체 개발 비용 산정을 위한 한국화요소 적용방안", 2009년도 춘계학술발표대회 논문집, pp. 697~700.
- 5) "NASA Cost Estimating Handbook", Volume 3, 2008, pp. 3\_9~3\_10.
- 6) Eric Mahr, Greg Richardson, "Development of the Small Satellite Cost Model (SSCM) Edition 2002", Aerospace Conference, Volume 8, 2003, pp. 8\_3831~8\_3841.
- 7) Wynholds.H.W, J.P.Skratt, "Weapon System Parametric Life Cycle and Cost Analysis", Proceedings of the 1977 Annual Reliability Symposium.
- 8) Gupta.A.K Saralees Nadarajah, Handbook of Beta Distribution and its Applications, 2004, pp. 33~54.
- 9) "Technology Readiness Assessment(TRA) Deskbook", 2009, DoD.
- 10) W.L.Notle, B.C.Kennedy, R.J.Dziegiel,Jr, "Technology Readiness Level Calculator", NDIA Systems Engineering Conference, 2003.
- 11) 서윤경, 오범석 "TRANSCOST 7.1을 적용한 실용위성 발사체 비용 추정", 항공우주기술, Vol. 6, No. 2, 2007, pp. 119~125.