

技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2011.39.6.567

TRANSCOST를 이용한 한국형발사체의 생산 및 운용 비용 추정

유동서*, 김홍래*, 최종권* 장영근**

Estimation of Production and Operation Cost of KSLV-II
using TRANSCOST

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

ABSTRACT

The development of space launch vehicle is an important step to advance to developed countries in the space area. It is also so risky due to necessity of huge costs and longer development period. The accuracy of cost estimation is important to develop a space launch vehicle successfully and efficiently. It is also necessary to estimate production and operation cost in order to develop commercial space launch vehicle possessing competitiveness.

In this paper, Korean factors to be able to reflect the current state of workforce, average working hours and technology readiness level in Korea were analyzed to estimate production and operation cost of space launch vehicles that are developed in Korea. Korean factors have been applied to production and operation cost estimation of KSLV-II based on TRANSCOST. We evaluated the competitiveness level of KSLV-II as the commercial launch vehicle in the commercial launch services market by comparing with cost per flight of foreign launch vehicles.

초 록

우주발사체 개발은 우주 선진국으로 도약하기 위해 반드시 필요한 중요한 사업이며 막대한 비용과 장기간의 개발기간이 소요되는 만큼 위험이 존재한다. 성공적이고 효율적인 우주발사체 개발을 위해서는 적절한 개발 비용 산정이 중요하다. 또한, 우주발사체를 상업용 발사체로 활용하기 위해서는 다른 우주발사체와의 경쟁력 비교를 위해 생산 및 운용 비용의 추정도 필요하다.

본 논문에서는 한국에서 개발되는 우주발사체의 생산 및 운용 비용을 추정할 수 있도록 한국의 인력 및 기술 수준, 평균 작업시간 등과 같은 요소를 반영할 수 있는 한국화요소에 대해 분석하였다. 또한, 한국화요소를 적용하여 KSLV-II의 생산 및 운용 비용을 추정해보고 해외 발사체의 발사 비용과 비교를 통해 발사체 서비스 시장에서 상업용 발사체로서 경쟁력을 평가하였다.

Key Words : Launch Vehicle(발사체), Cost Model(비용모델), Production Cost(생산 비용), Operation Cost(운용 비용), KSLV-II(한국형발사체), TRANSCOST

† 2010년 9월 29일 접수 ~ 2011년 5월 30일 심사완료

* 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

교신저자, E-mail : ykchang@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 항공대길 100

I. 서 론

우주 선진국이 되기 위해서는 위성 개발 능력 뿐만 아니라 자국의 기술로 스스로 개발한 우주

발사체를 발사할 수 있는 능력을 가지고 있어야 한다. 하지만 우주발사체 개발사업은 최첨단 과학기술과 천문학적인 비용을 필요로 하며 작은 위험요소로도 개발기간과 예산이 기하급수적으로 증가할 수 있는 위험성이 매우 큰 사업이다. 우주 선진국들의 우주발사체 개발사업을 살펴보면 비용으로 인해 상당히 어려움을 겪거나 사업을 중단하는 등 결국에는 실패하는 사례를 볼 수 있으며 개발을 성공하더라도 개발 비용을 상당히 초과하여 금전적으로 큰 손해를 입은 경우를 흔하게 볼 수 있다. 이처럼 우주발사체 개발에 있어 초기에 적절한 개발 비용 산정이 프로젝트의 성공여부를 좌우할 만큼 예산 산정의 중요성이 날로 강조됨에 따라 우주발사체 개발 비용 추정모델에 대한 활발한 연구가 진행되었고 그로 인해 다양한 비용모델과 소프트웨어가 개발되었다.

새로 개발된 우주발사체는 과학적 목적, 군사적 목적뿐만 아니라 상업적 목적으로도 많이 활용되고 있다. 현재 우주발사체의 상업적 목적이 점차적으로 커지면서 발사체 서비스 시장에서는 가격 경쟁이 매우 치열해지고 있으며 상업용 발사체로서 경쟁력을 향상시키기 위해서는 발사 비용을 절감시키기 위한 노력은 불가피하다. 발사 비용은 우주발사체를 생산하고 발사하여 운용하는데 소요되는 비용에 따라 결정되므로 우주발사체 개발사업을 시작하는데 있어 개발 비용 추정과 함께 우주발사체의 생산 및 운용 비용도 추정하여 우주발사체의 경쟁력을 평가해볼 필요가 있다. 하지만 우주발사체의 생산 및 운용 비용을 추정할 수 있는 비용모델은 개발 비용모델에 비해 턱 없이 부족하며 한국에서는 전무한 현실이다.

본 논문에서는 현재 우주 운송시스템 비용 추정에 널리 사용되고 있는 TRANSCOST를 통해 우주발사체의 생산 및 운용 비용을 추정할 수 있는 비용추정관계식을 이용하였고 한국의 개발 실정을 반영할 수 있는 한국화요소에 분석하여 한국에서의 우주발사체 생산 및 운용비용을 추정할 수 있도록 하였다.

현재 우리나라는 나로호(KSLV-I)의 후속사업으로 1.5톤급 실용위성을 지구저궤도(태양동기궤도)에 발사할 수 있는 KSLV-II 개발사업을 독자적으로 진행하고 있다. KSLV-II는 2021년과 2022년 두 차례에 걸쳐 시험 발사할 예정이다. 따라서 우주발사체 생산 및 운용 비용 추정모델을 KSLV-II에 적용하여 발사 비용을 추정하고 상업용 발사체로서의 경쟁력을 평가하고자 한다.

II. 본 론

2.1 TRANSCOST 소개

TRANSCOST는 1971년 저자가 독일 Technical University of Munich에서 쓴 논문 'Statistic-Analytical Cost Models for the Development and Fabrication of Space Systems'을 기반으로 개발되었다. 그 후로 계속해서 버전을 업데이트 하여 최근에는 2010년 TRANSCOST 8.0 버전이 나왔다. TRANSCOST는 유럽 및 미국 이외에도 러시아, 중국, 일본 그리고 인도 등 우주 개발을 활발하게 진행하고 있는 다양한 국가에서 사용되고 있다.

TRANSCOST는 크게 3개의 서브모델로 구성되어 있으며 그 서브모델은 개발 비용, 발사체 비용(생산, 통합 및 검증) 그리고 지상 및 비행 운용 비용 서브모델이 있다. 일반적으로 NAFCOM, SEER, PRICE와 같은 비용모델은 주로 개발 비용과 생산 비용을 추정해주지만 TRANSCOST는 운용 비용에 대한 비용추정관계식도 제공한다.

TRANSCOST의 특유한 특징 중에 하나는 비용가치로서 MYr(Man-Year)이라는 개념을 사용하는 것이다. MYr는 일반적으로 도입되는 개념은 아니지만 이것은 비용모델을 다른 기간의 프로젝트, 다른 통화수준을 가진 다양한 국가에서 사용하기 위한 유일한 방법이다. MYr의 비용은 개발기관 또는 회사의 연간 예산을 전체 인력의 수로 나누어 정의된다. MYr 값은 총체적인 값으로서 직접 인건비뿐만 아니라 경영, 마케팅 등 기타 추가적인 간접비를 모두 포함한다. 1MYr 당 비용은 인플레이션과 급여 등이 증가하기 때문에 매년 증가한다[1][2].

2.2 발사체 생산 비용

생산 비용은 재료비, 공정 및 제작비, 조립 및 검증, 인수시험 비용뿐만 아니라 엔지니어링 지원과 품질 보증 비용을 포함한다. 생산 비용을 추정하는데 있어 주요 인자는 First Unit Cost와 Learning Factor(p)가 있다. First Unit Factor는 첫 번째로 단위 구성품을 생산할 때 소요되는 비용이며 Learning Factor는 First Unit Cost와 비교했을 때 다음 생산되는 것에 대한 노력절감 정도를 고려한 것으로 생산 개수가 많은 경우 생산 비용을 결정하는 중요한 인자로 작용한다. 비용추정관계식의 기본 구조는 식 1과 같다. First Unit Cost는 비용 절감 인자 f_4 를 고려하지 않고

계산된 값이며 뒤이어 연속적으로 생산되는 단위 구성품의 비용은 비용 절감 인자 f_4 를 적용하여 구할 수 있다.

$$F = n \cdot a \cdot M^X \cdot f_4 \text{ (MYr)} \quad (1)$$

- n =발사체를 구성하는 단위 구성품의 개수
- M =단위 구성품의 질량(kg)
- f_4 =연속적으로 생산되는 단위 구성품의 비용 절감 인자
- X =단위 구성품의 질량 민감도
- a =회귀분석을 통해 얻어지는 계수

비용 절감 인자 f_4 는 식 2를 이용하여 구할 수 있다.

$$f_4 = \frac{1}{n_t} \sum_1^{n_t} \frac{\ln p}{\ln 2} = \frac{1}{n_t} \left(1 + 2 \frac{\ln p}{\ln 2} + \dots + n_t \frac{\ln p}{\ln 2} \right) \quad (2)$$

- n_t =정해진 기간 동안 연속적으로 생산되는 단위 구성품의 총 생산 개수
- p =Learning Factor

2.2.1 고체 추진제 로켓 모터 및 부스터

고체 추진제 로켓 모터 및 부스터의 생산 비용을 추정할 수 있는 비용추정관계식인 식 3은 미국, 유럽과 일본의 19개 발사체 프로젝트 데이터를 그림 1과 같이 회귀분석을 통해 얻어진다.

$$F_{ES} = 2.3 \cdot n \cdot M^{0.399} \cdot f_4 \text{ (MYr)} \quad (3)$$

- M =추진제를 포함한 모터 질량(kg)

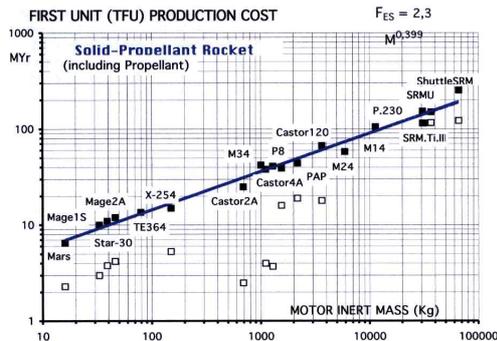


그림 1. 고체 추진제 로켓 모터 및 부스터 생산 비용 분석

2.2.2 액체 추진제 로켓 엔진

액체 추진제 로켓 엔진은 추진제 종류에 따라 극저온 추진제 로켓 엔진과 저장성 추진제 로켓 엔진으로 구분된다. 비용추정관계식인 식 4와 5는 23개 발사체 프로젝트 데이터를 그림 2와 같이 회귀분석을 통해 얻어진다.

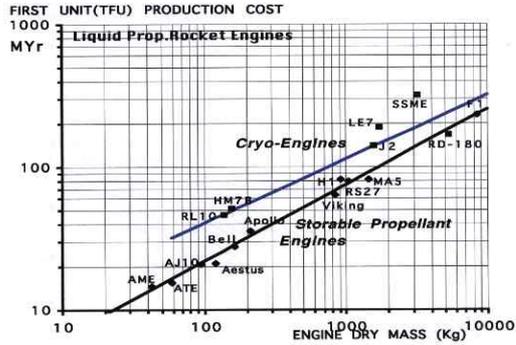


그림 2. 액체 추진제 로켓 엔진 생산 비용 분석

터보펌프식 극저온 추진제 로켓 엔진

$$F_{EL(c)} = 3.15 \cdot n \cdot M^{0.535} \cdot f_4 \text{ (MYr)} \quad (4)$$

가압식과 터보펌프식 저장성 추진제 로켓 엔진

$$F_{EL(s)} = 1.9 \cdot n \cdot M^{0.535} \cdot f_4 \text{ (MYr)} \quad (5)$$

- M =추진제를 제외한 엔진의 건조 질량(kg)

액체 추진제 로켓 엔진의 비용추정관계식에 적용할 비용 절감 인자 f_4 를 계산하기 위해서는 표 1을 이용해서 Learning Factor를 구해야 한다. 액체 엔진의 건조 질량이 결정되면 해당되는 범위에서의 Learning Factor를 계산한 후 보간법을 이용하면 생산 비용을 추정하고자 하는 액체 엔진의 Learning Factor를 구할 수 있다.

표 1. 액체 엔진의 Learning Factor

연간 생산량(x)	10kg	50kg	100kg	200kg
1			1	1
2-10	0.97675 $x^{-0.06274}$	0.99391 $x^{-0.06052}$	1.00425 $x^{-0.06009}$	1.01265 $x^{-0.05903}$
11-100	0.99627 $x^{-0.07195}$	1.01586 $x^{-0.06953}$	1.02630 $x^{-0.06853}$	1.03386 $x^{-0.06695}$
연간 생산량(x)	400kg	800kg	1,600kg	
1	1	1	1	
2				
3	1.02108 $x^{-0.05757}$	1.03019 $x^{-0.05724}$	1.03794 $x^{-0.05529}$	
4-10				
11-100	1.04054 $x^{-0.06512}$	1.04590 $x^{-0.06340}$	1.05489 $x^{-0.06215}$	
연간 생산량(x)	3,200kg	6,500kg	10,000kg	
1				
2		1	1	
3				1
4-10	1.04789 $x^{-0.05501}$	1.05574 $x^{-0.05362}$	1.06499 $x^{-0.05300}$	
11-100	1.06246 $x^{-0.06082}$	1.07007 $x^{-0.05938}$	1.07742 $x^{-0.05796}$	

2.2.3 발사체 본체 시스템

발사체 본체 시스템은 발사체에서 엔진을 제외한 모든 구성품을 포함한다. 비용추정관계식인 식 6과 7은 16개 발사체 프로젝트 데이터를 그림 3과 같이 회귀분석 통해 얻어진다.

극저온 추진제 발사체 본체 시스템

$$F_{VP} = 1.418 \cdot n \cdot M^{0.646} \cdot f_4 \quad (MYr) \quad (6)$$

저장성 추진제 발사체 본체 시스템

$$F_{VP} = 1.439 \cdot n \cdot M^{0.593} \cdot f_4 \quad (MYr) \quad (7)$$

- M=엔진의 질량을 제외한 발사체 건조 질량(kg)

발사체 본체 시스템의 생산 비용을 추정하는데 필요한 비용 절감 인자 f_4 도 액체 엔진과 같은 방법으로 표 2를 이용하여 Learning Factor를 구한 후에 계산할 수 있다.

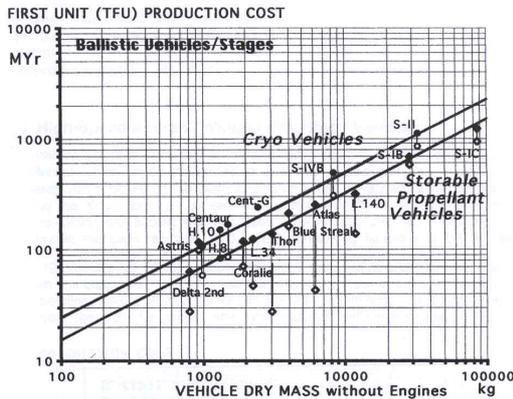


그림 3. 발사체 본체 시스템 생산 비용 분석

표 2. 발사체 본체 시스템의 Learning Factor

연간 생산량(x)	1kg	10kg	100kg
2-10	0.87383 $x^{-0.03637}$	0.89805 $x^{-0.03285}$	0.92474 $x^{-0.03144}$
11-100	0.88043 $x^{-0.03944}$	0.89906 $x^{-0.03395}$	0.92495 $x^{-0.03159}$
연간 생산량(x)	1,000kg	10,000kg	100,000kg
2-10	0.94866 $x^{-0.02754}$	0.97044 $x^{-0.02292}$	0.99504 $x^{-0.02160}$
11-100	0.95191 $x^{-0.02914}$	0.97678 $x^{-0.02598}$	0.99247 $x^{-0.02080}$

2.2.4 발사체 총 생산 비용

발사체를 생산하는 과정에서 제작, 조립 및 시험에 소요되는 총 생산 비용은 식 8과 같이 엔진과 발사체 본체 시스템의 생산 비용 합에 체계 종합 인자 f_0 와 생산력 인자 f_8 곱으로 얻는다.

$$C_F = f_0^N \left(\sum_1^n F_S + \sum_1^n F_E \right) f_8 \quad (MYr) \quad (8)$$

- f_0 =체계 종합 인자
- N=발사체 단 수
- ΣF_S =발사체 본체 시스템의 생산 비용
- ΣF_E =엔진의 생산 비용
- f_8 =생산력 인자

체계 종합 인자 f_0 는 발사체와 사업의 복잡도에 따라 1.02-1.03 값을 갖는다. 생산력 인자 f_8 은 미국을 기준(1.0)으로 해당 국가의 생산력이 어느 정도인지 나타내는 인자다.

2.3 발사체 운용 비용

운용 비용은 직접 운용 비용과 간접 운용 비용으로 나눌 수 있다. 직접 운용비용은 발사 및 임무 운용, 지상에서의 발사 준비에 직접적으로 관련된 활동 비용이며 간접 운용 비용은 단일 발사 운용과는 독립적인 비용을 포함한다.

2.3.1 직접 운용 비용

2.3.1.1 지상 운용 비용

지상 운용 비용은 발사체를 발사하기 위해 지상에서 준비하는 모든 활동을 포함하며 비용추정관계식은 식 9와 같다.

$$C_P = 8 \cdot M_0^{0.67} \cdot L^{-0.9} \cdot N^{0.7} \cdot f_v \cdot f_c \cdot f_4 \cdot f_8 \quad (9)$$

- C_P =지상 운용 비용(MYr per Flight)
- M_0 =발사 질량(ton)
- L=연간 발사율
- N=발사체 단 수
- f_v =발사체 종류의 영향 정도
 - 극저온 액체 추진제 발사체 $f_v=1.0$
 - 저장성 액체 추진제 발사체 $f_v=0.8$
 - 고체 추진제 발사체 $f_v=0.3$
- f_c =조립 및 통합 방식의 영향 정도
 - 발사대에서 수직 조립 및 점검 $f_c=1.0$
 - 수직 조립 및 점검 후 발사대 이동 $f_c=0.7$
 - 수평 조립 및 점검 후 발사대 이동 $f_c=0.5$
- f_4 =비용 절감 인자
- f_8 =생산력 인자

2.3.1.2 추진제 비용

추진제 실제 가격은 자원 생산량과 연간 수요에 영향을 받아 결정되기 때문에 가격 변동이 매우 불규칙하다. 추진제 가격은 표 3과 같다.

표 3. 추진제 가격

추진제	가격(MYr/ 1000ton(1Gg))
LH ₂ -Liquid Hydrogen	15-25
LOX-Liquid Oxygen	0.55-0.75
Kerosene-RP-1	3.9
N ₂ H ₄ -Hydrazine	200-275
MMH-Monomethylhydrazine	500-650

2.3.1.3 발사 및 임무 운용 비용

발사 및 임무 운용 비용은 임무를 계획하는 단계에서부터 발사되어 우주까지 비행하는 동안에 수행되는 모든 활동들을 포함하며 비용추정관계식은 식 10과 같다.

$$C_m = 20(\sum Q_N)L^{-0.65} \cdot f_4 \cdot f_8 \quad (10)$$

- C_m=발사 및 임무 운용 비용(MYr per Flight)
- Q_N=발사체 복잡도에 따른 특성 값
 - 소형 고체 모터 Q_N=0.15 ea.
 - 액체 추진제 엔진 또는 대형 부스터 Q_N=0.4 ea.
- L=연간 발사율
- f₄=비용 절감 인자
- f₈=생산력 인자

2.3.2 간접 운용 비용

간접 운용 비용은 발사체 크기와 발사 및 운용 활동과는 독립적으로 매년 일정하게 지출되는 모든 비용을 포함한다. 연간 지출되는 간접 운용 비용을 연간 발사율로 나눈 비용이 발사 당 소요되는 생산 및 운용 비용의 부분이 된다. 간접 운용 비용은 국가 또는 발사장 상황에 따라 매우 유동적이며 연간 발사율이 6-12기일 경우 간접 운용 비용은 생산 및 운용 비용의 8~15% 정도 차지한다.

2.3.2.1 프로그램 관리, 시스템 경영 및 마케팅

유럽의 아리안스페이스사와 같은 상업 우주 발사 서비스 업체는 회사를 관리 및 경영하기 위해서는 일정 규모의 인력이 필요하므로 이에 대한 인건비가 소요된다. 회사의 직원들은 마케팅 및 고객관리, 발사체 조달 및 노사 관계, 계약 체결, 회계 관리 등과 같은 업무를 수행한다. 또한, 여기서는 세금, 예비비 및 보험료와 같이 정부차원에서 지출되는 모든 비용을 포함한다.

2.3.2.2 기술적 시스템 지원

우주 발사 서비스 업체는 발사체 개발은 할 수 없더라도 일정 수준의 기술 지원 능력을 갖추고 있어야 한다. 여기서 요구되는 기술 지원 업무는 발사체의 기술 표준, 성능 감독 및 사용자

안내서 업데이트, 발사체 조달을 위한 산업 계약의 기술적 관리, 실패 분석 및 기술 개량 수행 등을 포함한다.

2.3.2.3 발사장 지원 및 보수 관리

발사장은 정부 기관에서 특정 예산 하에 설립되므로 국가 차원의 위성 발사는 이 분야의 비용은 지출하지 않아도 된다. 상업 우주 발사 서비스 업체의 경우에는 발사장의 시설을 이용하기 위해서는 매달 혹은 매년 정기적인 요금을 지불해야 한다.

2.4 한국화요소(Korean Factors) 산정

2.4.1 TRANSCOST의 한계

현재 국내에는 발사체 비용모델이 없기 때문에 해외 비용모델 TRANSCOST를 사용한다. 하지만 TRANSCOST의 데이터베이스는 주로 미국의 프로젝트를 기반으로 되어 있기 때문에 비용 추정 결과는 미국의 생산력에 맞춰져 있다. 따라서 정확한 비용 추정을 하기 위해서는 한국 상황에 적합한 비용 요소에 대한 연구가 필요하다.

TRANSCOST가 한국 발사체의 비용 추정에 사용될 수 있지만 결과 값인 MYr에 대한 보정이 필요하다. 표 4는 비용 단위로 사용되는 MYr를 연도별 미국, 유럽, 일본의 수치로 보여주며 한국에서 개발되는 발사체의 비용을 분석하기 위해서는 정확한 한국의 MYr 수치가 필요하다.

또한, TRANSCOST에는 유럽, 일본, 러시아 및 중국 등의 생산력 인자가 주어져 있지만 한국의 생산력 인자는 제공되고 있지 않으므로 한국의 생산력을 타 국가의 생산력과 비교하여 비용 추정 및 평가에 활용할 수 있는 한국의 생산력 인자를 산정할 필요가 있다[3].

표 4. 미국, 유럽, 일본의 연도별 MYr 수치

YEAR	USA(\$)	Europe(Euro)	Japan(M.Yen)
2000	208,700	190,750	23.2
2001	214,500	195,900	23.8
2002	222,600	201,200	24.4
2003	230,400	207,000	25.0
2004	240,600	212,800	25.6
2005	250,200	219,200	26.3
2006	259,200	226,300	26.9
2007	268,800	234,800	27.5
2008	278,200	243,600	28.2
2009	286,600	252,700	29.0

2.4.2 한국의 생산력 인자 산정

TRANSCOST에 제시된 미국을 기준(1.0)으로 한 국가별 생산력 인자는 표 5와 같다. 생산력 인자는 총 3가지 지표를 종합하여 정해지는데 지표에는 1인당 연간 업무시간, 교육 정도, 업무에 대한 헌신도가 있다. TRANSCOST에 명시된 3가지 지표는 1980년-1999년 기간 동안의 자료를 기준으로 하였으며 본 연구에서는 2005년-2007년 OECD 통계자료를 기반으로 계산하였다[4]. 한국의 1인당 연간 업무시간은 타 국가보다 월등히 높은 2316시간으로 조사되었다. 이는 TRANSCOST의 적용 식에 의해 변환된다.

각 국가의 교육 정도는 대학진학 비율을 기반으로 계산되며 한국의 경우 미국(1.0)에 비해 약 30%가 높은 1.30으로 조사되었다.

업무에 대한 헌신도의 경우 일본과 비슷한 것으로 가정하여 일본과 같은 1.18로 부여한다. 이는 '한국과 일본 노동자의 일에 대한 헌신도 비교연구' 논문을 근거하였다[5]. 논문의 연구 결과에 따르면 일에 대한 헌신도는 일본이 한국보다 조금 높지만(일본 21.3%, 한국 19.7%), 조직 헌신도는 한국이 일본보다 조금 높은 것(한국 22.35%, 일본 21.83%)으로 나타났다.

각 지표를 기반으로 계산된 한국의 생산력 인자는 표 5와 같이 0.53이다.

표 5. 각 국가의 생산력 인자

	Working Hrs	W.H. modif.	College Rate	Education Normalized	Dedication	Relative Productivity		MYr
US	1705	183	39.2	1.00	1.00	183	1.00	1.00
France	1533	170	39.3	1.00	1.10	187	1.02	0.98
Germany	1433	162	24.6	0.63	1.13	115	0.63	1.59
Japan	1785	189	53.2	1.36	1.18	302	1.65	0.60
Korea	2316	227	51.0	1.30	1.18	348	1.90	0.53

2.4.3 한국의 MYr 보정치 산정

한국의 MYr 보정치는 과학기술통계서비스 인터넷 사이트에서 제공되는 자료를 바탕으로 산정되었다[6]. 활용된 자료는 연간 연구개발비와 총 연구원 수이다. 연간 연구개발비는 경상비와 자본적 지출로 나뉜다. 경상비의 경우 인건비, 교육비 등을 포함하며 자본적 지출비의 경우 기계장치, 토지 건물 등을 포함한다.

한국의 MYr 보정치는 연간 연구개발비를 총 연구원 수로 나누어 계산된다. 2000년부터 2009년까지 각 연도별 연구개발비, 총 연구원 수 및 계산된 MYr 보정치 값은 표 6과 같다.

표 6. 한국의 MYr 보정치

YEAR	연구개발비 (억 원)	총 연구원 수 (명)	MYr 보정치(억 원)
2000	138,485	138,077	1.00
2001	161,105	165,715	0.97
2002	173,251	172,270	1.01
2003	190,687	186,214	1.02
2004	221,853	194,055	1.14
2005	241,554	215,345	1.12
2006	273,457	237,599	1.15
2007	313,014	269,409	1.16
2008	344,981	294,440	1.17
2009	379,285	309,063	1.23

표 7. TRANSCOST에 제시된 미국의 MYr와 계산된 MYr의 오차

	Actual MYr(\$)	개발비 (M.\$)	연구원 (명)	MYr(\$)	Error (%)
1999	203,000	245,548	1,260,920	194,737	4
2000	208,700	268,121	1,289,782	207,881	0
2001	214,500	278,239	1,319,705	210,834	2
2002	222,600	277,066	1,342,454	206,388	7
2003	230,400	289,736	1,430,551	202,535	12
2004	240,600	300,840	1,393,523	215,884	10
2005	250,200	323,853	1,387,882	233,343	7

표 6에서 계산된 한국의 MYr 보정치에 대한 검증은 TRANSCOST에 제시된 미국의 MYr 값을 같은 방법으로 계산하여 할 수 있다. 표 7은 TRANSCOST에 제시된 미국의 실제 MYr 값, 연간 개발비 및 연구원 수를 보여준다. 이 자료를 바탕으로 미국의 MYr 값을 한국의 MYr 보정치를 계산했던 방법으로 계산하면 표 7과 같다. 이렇게 계산된 미국의 MYr 값과 TRANSCOST에 제시된 미국의 실제 MYr 값을 비교해보면 약 10% 정도의 오차를 가지므로 한국의 MYr 보정치 또한 그 정도의 오차를 갖는다고 볼 수 있다.

2.5 KSLV-II의 생산 및 운용 비용 추정

지금까지 알아본 발사체 생산 및 운용 비용 추정을 위한 비용추정관계식을 이용하여 현재 개발 중인 KSLV-II의 발사 당 생산 및 운용 비용을 추정하고자 한다. 각 비용추정관계식에는 다양한 비용인자들이 사용되며 정확한 비용을 추정하기 위해서는 현재 상황을 정확히 반영하도록 비용 인자를 선택해야 한다. 비용 인자를 정확히

표 8. 개념설계 단계의 KSLV-II 제원

	1 단	2 단	페어링	3 단	인공위성
총질량 (ton)	150	36	0.8	11.5	1.5
추진제 질량(ton)	135	31.5		9.7	
구조+잔류 추진제 질량(ton)	15	4.5		1.8	

표 9. KSLV-II의 각 단 엔진 구성

	1단	2단	3단
엔진 구성	75톤급 터보펌프식 액체엔진 4개 클러스터링 구성	75톤급 터보펌프식 액체엔진 1개	5~10톤급 가압식 액체 엔진
엔진 건조 질량	4 x 1,000kg	1,000kg	120kg

반영하지 못한다면 상당한 오차가 발생할 수 있으므로 주의해야 한다.

비용추정관계식을 계산하기 위해 가장 중요한 매개변수는 질량이며 KSLV-II의 생산 및 운용비용을 추정하는데 필요한 KSLV-II의 제원은 표 8 과 같다. 또한, 각 단의 엔진 구성은 표 9와 같다. 표 8과 9를 통해 제원을 확인해보면 KSLV-II의 생산 비용은 1, 2단의 1000kg 액체 엔진 5개, 3단의 120kg 액체 엔진 1개 그리고 엔진을 제외한 발사체의 구성품을 모두 포함하는 각 단의 본체 시스템으로 구성된다[7].

그리고 KSLV-II의 운용 비용을 추정하기 위해서는 추진제 종류와 조립 및 통합 방식을 선택해야 한다. KSLV-II는 추진제로 케로신과 액체산소를 사용하는 저장성 추진제 발사체이고 수평 조립 및 점검 후에 발사대로 이동하는 방식을 사용한다고 가정한다.

각 비용추정관계식에는 생산력 인자 f_8 이 존재하는데 정확한 비용을 추정하기 위해서는 발사체를 개발 및 생산을 주도하는 해당 국가의 실정을 정확하게 반영해주어야 한다. 이를 반영하기 위해서 사용되는 비용 인자가 바로 생산력 인자 f_8 이며 KSLV-II의 생산 및 운용 비용을 추정하기 위해서 한국의 생산력 인자 0.53을 적용한다.

위에서 정의한 KSLV-II의 가정 사항들과 함께 생산 및 운용비용 추정을 위한 비용추정관계식을 이용하여 연간 발사율이 1-5기일 때 KSLV-II의

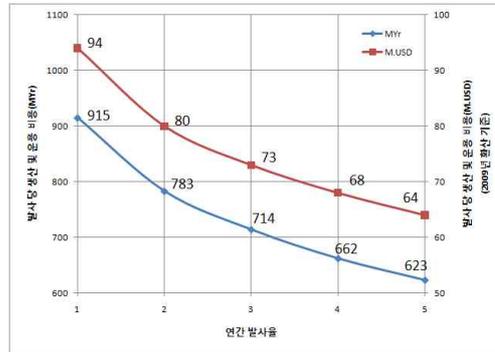


그림 4. KSLV-II의 발사 당 생산 및 운용 비용(보험료 별도)

발사 당 생산 및 운용 비용을 추정하면 그림 4와 같다.

추정된 KSLV-II의 발사 당 생산 및 운용 비용은 그림 4와 같이 연간 1기를 발사할 경우 915MYr가 소요되는데 비해 연간 5기를 발사하게 되면 발사 당 생산 및 운용비용은 623MYr로 약 32% 정도 감소하는 것을 알 수 있다. 연간 발사율이 증가할수록 발사 당 생산 및 운용 비용은 상당히 감소함을 볼 수 있다. 따라서 KSLV-II의 발사 당 생산 및 운용 비용을 줄이기 위해서는 무엇보다도 연간 발사율을 높이는 것이 중요하며 꾸준히 발사하여 발사 횟수를 늘려 높은 신뢰성을 확보해야 한다.

또한, 추정된 KSLV-II의 발사 당 생산 및 운용 비용을 해외 상업용 발사체의 발사 비용과 비교함으로써 KSLV-II가 상업용 발사체로서 발사체 서비스 시장에서 경쟁력을 갖출 수 있는지 판단해볼 수 있다. 우주발사체가 상업용 발사체로서 경쟁력을 갖기 위해서는 우수한 성능과 높은 신뢰성은 물론 발사 가격이 저렴해야 한다. KSLV-II는 1.5톤급 위성을 태양동기궤도로 발사할 목적으로 개발되고 있으므로 태양동기궤도에서 KSLV-II와 동급이거나 비슷한 탑재 성능을

표 10. 해외 상업용 발사체의 발사 비용

Launch Vehicle	Payload(kg)	Price/Cost per Flight(M.USD)
VEGA	1,500	20
DELTA-II 7320	1,652	35
PSLV	1,280	12-15
ROCKOT	1,200	12-14

가진 해외 상업용 발사체의 발사 비용과 비교를 하면 KSLV-II의 현재시점에서 상업용 발사체로서 경쟁력이 있는지 가늠해볼 수 있고 상업용 발사체로 활용하기 위한 요구조건을 예측해 볼 수 있다. KSLV-II와 탑재 성능이 비슷한 해외 상업용 발사체의 발사 비용은 표 10과 같다[8][9].

해외 상업용 발사체와 KSLV-II의 발사 비용을 비교하기 위해서는 비용추정관계식을 통해 계산된 MYr 값을 USD로 환산해야 한다. 2009년 기준으로 한국의 MYr 보정치는 1MYr 당 1.23억 원이며 이를 통해 원화로 환산한다. 그리고 환율을 1200원/USD로 가정하여 USD 값으로 환산하면 그림 4와 같다. 연간 발사율이 5기일 경우 KSLV-II의 발사 당 생산 및 운용 비용은 약 64M.USD이다. KSLV-II의 발사 당 생산 및 운용 비용을 해외 상업용 발사체의 발사 비용과 비교해보면 해외 상업용 발사체보다 훨씬 비싸므로 상업용 발사체로서 높은 경쟁력을 갖기는 힘들 것으로 판단된다. 하지만 발사체의 발사 비용은 계약 국가 간의 관계, 계약 상황, 발사체의 신뢰성 등 다양한 요소에 의해 매우 유동적으로 변하는 경우가 있으며 일반적으로 발사 서비스를 자주 이용하는 단골 고객일 경우 발사 비용을 할인해주는 것을 흔히 볼 수 있다. 따라서 KSLV-II가 발사체 서비스 시장에서 경쟁력을 갖기 위해서 수많은 발사 성공으로 발사체에 대한 신뢰도를 높이고 발사 보험료를 낮추는 등의 노력을 한다면 충분히 KSLV-II의 발사 비용을 줄일 수 있다.

III. 결 론

많은 비용과 긴 개발 기간이 필요한 우주발사체 개발사업의 성공을 위해서는 사업 초기 정확한 개발 비용을 추정하여 적절한 예산을 수립하는 것이 중요하다. 발사체 개발이 성공한 후에 발사체를 한 번 발사하고 끝나는 것이 아니라 추가적인 사용 또는 상업적 목적을 위하여 지속적으로 발사체를 생산하고 발사하게 된다. 그러므로 개발 비용뿐만 아니라 발사체를 생산하고 발사하는데 소요되는 생산 및 운용 비용도 추정하여 분석할 필요가 있다.

본 논문은 생산 및 운용 비용에 대한 중요성을 인지하고 TRANSCOST를 이용하여 발사체의 생산 및 운용 비용을 추정시 중요한 인자인 한국화요소에 대해 분석하였다. 이렇게 TRANSCOST의 생산 및 운용 비용추정관계식을 통해 추정된 생산 및 운용 비용에 발사 실패에 대한 보험과

제 3자 배상책임보험 그리고 사업상의 이익을 고려하면 완전한 발사체의 발사 가격을 추정할 수 있다.

TRANSCOST의 생산 및 운용 비용추정관계식에 한국의 실정을 고려해줄 수 있는 한국화요소를 적용하여 KSLV-II의 발사 당 생산 및 운용 비용을 추정하였다. KSLV-II의 발사 당 생산 및 운용 비용은 연간 발사율이 증가할수록 점점 감소함을 알 수 있었고 탑재 성능이 비슷한 해외 상업용 발사체의 발사 비용과 비교함으로써 KSLV-II가 상업용 발사체로서 경쟁력을 가질 수 있는지 평가해보았다. KSLV-II의 발사 비용은 해외 상업용 발사체에 비해 상대적으로 높고 한국에서 처음 개발된 발사체임을 감안하면 발사 서비스 이용자 입장에서 KSLV-II는 아직 매력적이지 못한 발사체라 할 수 있다. 하지만 한국이 KSLV-II 개발을 시작으로 지속적인 발사체에 대한 투자와 개발로 자국의 기술을 꾸준히 쌓아 발사체의 발사 비용을 낮추고 해외 이용자들한테 충분한 신뢰를 얻는다면 한국의 발사체도 상업용 발사체로서 충분히 매력적인 발사체로 거듭날 수 있다.

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.
- 2) 유일상, 서윤경, 이준호, 오범석, "우주발사체 개발사업의 비용 추정 현황 및 사례", 한국산업경영시스템학회지, Vol. 30, Sep. 2007, pp. 165~173.
- 3) 강석진, 장영근, "한국에서의 발사체 개발 비용 산정을 위한 한국화요소 적용방안", 한국항공우주학회 2009년도 춘계학술발표회 논문집, 2009, pp. 697~700.
- 4) Organisation for Economic Co-operation and Development, <http://www.oecd.org>.
- 5) 장상희, 조정문, "문화와 일에 대한 태도-한국과 일본 노동자의 일에 대한 헌신도 비교연구", 한국사회학회지, Vol. 38(3), 2004, pp. 39-80.

- 6) 과학기술통계서비스, <http://sts.ntis.go.kr>.
- 7) 장영근, “발사체 개발비용 산정 및 평가 모델 개발(2009-0094086)”, 교육과학기술부, 2009.
- 8) Ascend SpaceTrak® [online database], <http://http://ascendspacetrak.com/Home/Login.aspx>.
- 9) S. Isakowitz, J. Hopkins, J. Hopkins Jr., "International Reference Guide to Space Launch Systems, AIAA, 2003.