



Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2019.23.4.001>

재사용발사체의 비용 효용성에 미치는 임무중량의 영향

양수석^{a,*}

Impacts of Payload Weights on the Cost Effectiveness of Reusable Launch Vehicles

Soo Seok Yang^{a,*}

^a*AeroPropulsion Office, Korea Aerospace Research Institute, Korea*

^{*}*Corresponding author. E-mail: ssyang@kari.re.kr*

ABSTRACT

Recently, in the space market, there has been a rapid reduction of the launch price. The major reason is that a few commercial companies, especially SpaceX, began to enter into the space market about ten years ago, which has changed the space market from monopolization to competition, and accelerated the adoption of commercial efficiency in the technology and management. Also, the successful landing and recovery of a first stage in 2016 by SpaceX proved to be a prelude to opening a new era of reusable launch vehicles, and SpaceX declared the groundbreaking launch price through using the reusable launch vehicle. This study calculates the total launch cost required to put a certain satellite into the LEO, compares the launch cost in three cases with different payload weights, and reviews the impacts of the payload on the cost effectiveness of a reusable vehicle. The total launch cost is divided into 6 subsections cost, namely development cost, production cost, refurbishment cost, operation cost, fixed-cost of factory and launch site, and insurance cost. The cost estimation relationships used in the calculation are taken from the commonly proven cost models such as TRNSCOST.

초 록

최근 위성발사체 시장에서 발사가격은 상당한 수준으로 낮아지고 있다. 이것은 약 10년전부터 발사 시장에 SpaceX 등의 민간기업이 진입하면서 소수 기업의 독점체제가 민간을 포함한 경쟁체제로 변화였고, 민간기업의 기술 및 경영 효율화가 적극적으로 도입되고 있기 때문이다. 또한 SpaceX는 2016년에 위성발사체 1단의 회수에 성공함으로써 재사용발사체의 서막을 열었고, 향후 재사용발사체를 활용하여 위성발사 가격을 획기적으로 낮추겠다고 공언하고 있다. 본 연구에서는 어떤 한 위성을 LEO 궤도에 올리기 위하여 필요한 총 발사비용을 계산하고, 3가지 경우의 임무중량에 대하여 각각의 발사비용을 비교하여 재사용발사체의 비용 효용성에 미치는 임무중량의 영향에 대하여 알아본다. 발사비용은 개발비용, 제작비용, 재사용비용, 운용비용, 고정비용 및 보험비용으로 구분하여 계산하며, 각 계산에 사용된 비용추정관계식은 TRNSCOST 등의 비용계산모델을 활용하여 사용하였다.

Key Words: Reusable Launch Vehicle(재사용 발사체), Launch Cost(발사비용), Cost Estimation Relationship(가격추정 관계식), Refurbishment Cost(재사용 수리비용)

Received 25 April 2019 / Revised 15 May 2019 / Accepted 16 May 2019

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

MY	: engineering Man-Year cost
M	: inert mass of vehicle or payload
N_{re}	: maximum number of reusability
N_m	: number of production vehicle
N_f	: number of flight
f_1	: technical status factor
f_2	: cost effectiveness factor
f_3	: team experience factor
f_8	: Man-Year correction factor

Sub Index;

p	: payload
d	: development
m	: production
e	: expendable vehicle
re	: reusable vehicle
fu	: first unit of production
op	: operation
fm	: fixed cost of factory
fl	: fixed cost of launch site
b	: reference vehicle

1. 서 론

지난 50년간 위성발사체의 발사비용에 대한 논란은 지금까지 계속되어 왔다. 그 논란의 핵심은 위성발사체를 재사용함으로써 발사비용을 줄일 수 있다는 의견과 재사용으로 인한 발사비용 저감 효과는 거의 없으며 오히려 발사비용이 높아진다는 의견이다.

재사용을 통하여 발사비용을 획기적으로 줄일 수 있다는 야심찬 계획으로 시작된 대표적인 프로그램이 Space Shuttle이다. 일주일에 한번 발사, 최대 재사용 100번, 10년 수명으로, 발사비용을 118\$/lb(1972년 달러)로 낮추겠다는 계획서를 미의회에 제출하여 승인받음으로써 1972년부터 시작된 Space Shuttle 개발은 1981년 첫 발사를 성공하였으나 발사비용이 계획한 것에 비하여

엄청나게 높을 뿐만 아니라 2번의 대형 참사를 겪으면서 결국 2011년에 프로그램이 종료되었다.

2011년 가격으로 비교하면 Space Shuttle 발사비용은 약 450M\$로 기존 발사체의 4배 정도로 비쌌다. 1981년부터 2011년까지 총 135회 발사된 Space Shuttle의 개발비, 운용유지비 등을 모두 포함하여 평균 발사비용을 환산하면 발사당 1,500M\$, 임무중량당 60,000\$/kg에 이를 만큼 비경제적인 발사체였다[1-3].

Space Shuttle로부터 얻은 교훈을 통하여 재사용발사체가 결코 경제적이지 않다는 의견이 2010년 초반까지는 지배적이었으나, 2000년대 초반부터 민간기업으로서 위성발사시장에 뛰어들어 SpaceX의 재사용발사체 성공으로 재사용발사체의 발사비용에 대한 논란이 다시 시작되었다. SpaceX는 재사용발사체 개발을 2011년부터 시작하여 2016년에 상업용 위성발사에서 발사체 1단의 회수에 성공하였으며, 향후 위성발사비용을 현재의 1/10 수준으로 낮출 수 있다고 공언하고 있다.

재사용발사체를 옹호하는 대표적인 전문가로서 SpaceX의 Elon Musk는 “재사용발사체를 지금의 항공기와 같은 개념으로 발전시키면 발사비용은 현재의 1/100 수준으로 낮아질 것이다”라고 주장하고 있고, Amazon의 Jeff Bezos도 “재사용발사체로 발사비용이 줄어들면, 우주시장도 인터넷 시장처럼 빠르게 발전할 것이다”라고 주장하는 반면에, 재사용발사체에 호의적이지 않은 Arianespace의 Stephen Israel은 “재사용발사체의 비용 효율성은 발사횟수에 달려 있는데, 현재 위성발사시장의 예측치로는 재사용발사체가 유리하다고 할 수 없다”라고 말하고 있다[3]. 따라서 이러한 논란은 앞으로도 상당기간 계속될 것이며, 재사용발사체의 기술 발전과 위성발사시장의 성장 여부에 따라 우열이 결정되어 질 것으로 판단된다.

본 연구에서는 현재의 기술 수준에서 재사용발사체와 기존발사체의 발사비용을 발사횟수에 따라 비교 분석하였으며, 발사비용에 영향을 주는 중요한 비용인자에 따라서 발사비용이 어떻게 달라지는가에 대하여 알아보았다. 이러한 연

구를 통하여 향후 위성발사체 시장에서 가격 경쟁력을 확보하기 위해서는 어떠한 발사체를 어떻게 개발하여야 하는가에 대한 방향 제시가 될 것이라고 생각한다.

2. 발사비용 계산 방법

발사비용은 현재 위성발사체 시장에서 공개되어 있는 발사가격과는 달리 정확한 값을 알 수가 없으며 각 회사들이 공개하지도 않기 때문에 추정할 수밖에 없다. Table 1에서 보는 바와 같이 러시아 등의 동구권 발사체의 발사가격이 낮은 이유는 자국의 발사체에 대한 정책적인 지원 때문으로 판단되며, SpaceX를 제외한 대부분의 발사체의 경우에도 과거에는 개발비의 전액을 국가가 부담하는 국가 주도형 개발체제하에서 개발된 발사체이기 때문에 개발비용을 제외한 상태에서 발사가격이 결정된 것으로 추정된다.

본 연구에서는 발사에 소요되는 모든 비용을 포함하도록 발사비용을 개발비용, 제작비용, 재사용비용, 운용비용, 고정비용 및 보험비용으로 나누어 총 6가지로 계산한다. 발사비용에서 금융비용은 제외하였기 때문에, 금융비용과 기업의 이윤 등을 더하여 발사가격이 최종적으로 결정된다. 따라서 기업의 사업 전략 등에 따라 발사가격은 발사비용과는 다르게 책정된다. 비용은 ROM(Rough Order of Magnitude)비용이며, 비용을 계산하기 위하여

사용된 비용추정관계식(Cost Estimation Relationship, CER)은 현재 위성발사체의 비용 모델로서 널리 알려진 TRANSCOST, NAFCOM 등에서 사용된 CER을 활용하여 사용하였으며[5,6], 비용모델에 사용된 계수들은 현재의 기술수준 및 인터넷을 통하여 공개된 여러 자료들을 최대한 반영하여 결정하였다[7-11]. 본 연구에서 가격추정관계식으로 계산되는 것은 인/연(Man-Year)이며, 2019년도 미국의 엔지니어링 인/연 임플을 기준으로 비용을 계산하였다.

2.1 개발비용

위성발사체의 개발비용은 단별로 나누어 계산하기도 하고, 엔진을 별도로 구별하여 계산하기도 하며, 그 계산방법은 비용모델에 따라 다르다. 또한 대부분의 비용 모델에서 개발비용은 발사체의 구조중량과의 관계식으로 계산한다. 그러나 본 연구에서는 위성발사체의 특성과는 관계없이 동일한 위성을 동일한 궤도에 진입시킬 때의 위성발사체의 발사비용을 비교하기 위한 연구 목적에 적합하도록 개발비용을 Eq. 1과 같이 발사체의 임무중량으로 나타낸다.

$$MY \sim M^n \sim M_p^n \quad (1)$$

여기에서 n 은 비용모델에 따라 조금씩 다른 값을 사용하는데 본 연구에서는 0.55를 사용한다.

또한 개발비용은 개발하는 대상의 기술 성숙도, 개발 방법의 비용 효율성, 개발팀의 경험, 개발 국가에 따른 근무 환경 등에 따라 달라지기 때문에 이를 고려할 수 있는 계수들을 적용하여 Eq. 2에 따라 계산한다.

$$MY_{d,e} = 31M_p^{0.55} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_8 \quad (2)$$

여기에서 비례상수는 TRANSCOST에서 구조중량으로 계산된 비용모델을 임무중량으로 바꾸면서 동일한 개발비용이 계산되도록 수정한 값이다[12].

위성발사체를 재사용하기 위해서는 설계 단계

Table 1. Launch price of major countries [4].

Nation	Launch Vehicle	Payload (kg)	Launch Price(\$/kg)
USA	Atlas V	18,800	8,100
	Falcon 9	22,800	2,700
EU	Ariane 6	21,700	5,300
Russia	Proton-M	23,000	2,800
Japan	H2B	16,500	6,800
China	LM 7	13,600	5,100

에서부터 재사용을 위한 설계개념이 도입되어야 하고 재사용을 위한 재료의 선정 등도 달라져야 한다. 따라서 한번 사용하고 폐기하는 기존발사체와는 달리 개발비용이 증가하게 되므로 이를 고려하여야 하고, 특히 SpaceX의 재사용발사체의 개발에서 알 수 있듯이 재사용을 위한 회수 시험 등 많은 비행시험이 수행되어야 한다. 또한 재사용 가능한 횟수에 따라 기술의 난이도가 높아지고, 개발에 소요되는 비용도 커지게 된다. 따라서 재사용발사체의 개발비용은 이러한 추가적인 비용을 고려하여 Eq. 3과 같이 계산한다.

$$MY_{d,r} = 1.5MY_{d,e} \cdot (N_{re}/10)^{0.3} + 2000 \quad (3)$$

여기에서 비례상수와 나머지 상수는 TRANSCOST의 비용모델[12]에서 가져온 값이며, 지수 상수는 재사용횟수 10번을 기본으로 하여 100번 재사용 가능한 발사체를 개발할 때의 개발비용이 2배로 증가한다고 가정하여 0.3으로 정한다.

개발비용은 분할 상환하는 방식으로 발사비용에 포함된다. 따라서 몇 년간에 걸쳐서 상환할 것인가에 따라서 연간 상환비용이 달라지며, 이때 매년 물가상승률이 고려되어 상환되어야 한다. 따라서 개발비용의 연간 상환비용은 Eq. 4와 같이 계산한다.

$$C_d = C_{d,t} \cdot \frac{y \cdot (1+y)^e}{(1+y)^e - 1} \quad (4)$$

여기에서 y 는 상환 기간, e 은 매년 평균 물가상승률이다.

2.2 제작비용

위성발사체의 제작비용은 개발비용과 마찬가지로 비용모델에 따라 단별로, 또한 엔진은 별도로 구분하여 계산하기도 하며, 대부분의 비용모델에서는 구조중량과의 관계식으로 계산한다. 그러나 앞서 개발비용에서 설명한 바와 같이, 본 연구의 목적에 맞게 임무중량과의 관계식으로 아래 Eq. 5와 같이 계산한다.

$$MY_{m,e} = 0.45M_p^{0.66} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_8 \quad (5)$$

여기에서 지수상수와 비례상수는 TRANSCOST의 비용모델[12]에 근거하여 수정한 값을 사용한다.

Eq. 5에서 계산한 제작비용은 첫 번째 제작된 발사체의 제작단가이다. 그런데 제작대수가 늘어나면 제작비용은 조금씩 줄어들게 되며 이것을 고려하기 위하여 일반적으로 Eq. 6과 같은 Learning Curve를 적용한다[13].

$$C_n = C_{fu} n^p \quad \text{where, } p = \frac{\log(f_{lc})}{\log 2} \quad (6)$$

여기에서 C_n 은 n 번째 제작된 발사체의 제작 단가이며, C_{fu} 는 첫 번째 제작된 발사체의 제작 단가이다. f_{lc} 은 Learning Curve Factor이며 제작 환경에 따라 0.85 ~ 0.95 정도에서 정한다.

개발비용과 마찬가지로 제작비용에서도 재사용발사체의 경우에는 기존발사체에 비해서 크게 증가하며, 재사용 횟수에 따라서도 늘어난다. 이 같은 비용 증가를 고려하여 재사용발사체의 제작비용은 Eq. 7로 계산한다.

$$MY_{m,r} = 1.8MY_{m,e} \cdot (N_{re}/10)^{0.3} \quad (7)$$

2.3 재사용 비용

재사용 비용은 회수한 발사체를 수리하고, 검사 및 시험하여 다시 사용 가능한 발사체로 복원 하는데 소요되는 모든 비용을 말한다. 재사용 비용이 많이 들어가면 재사용발사체의 비용 효율성이 떨어지게 되게 되는데, Space Shuttle의 경우에는 이 비용이 당초 계획보다 엄청나게 많이 소요됨으로써 프로그램 실패의 큰 원인이 되었다.

적정한 재사용 비용을 산정하는 것은 비용분석에서 쉽지 않은 것이며, 재사용발사체를 개발할 때에는 재사용 비용이 개발의 중요한 목표가 된다. 본 연구에서는 재사용비용을 첫 번째 발사체의 제작비용을 기준으로 정한다.

또한 재사용을 계속하게 되면 수리해야 할 부품

등이 당연히 늘어나게 되고, 검사 및 시험 비용도 증가하게 된다. 이러한 비용 증가분은 Eg. 6과 같은 Learning Curve를 적용하여 고려할 수 있는데, 재사용 비용에 사용되는 Learning Curve Factor는 1.1 ~ 1.2 정도로 정하여 이 효과를 고려한다.

2.4 운용비용

발사체를 발사하기 위해서는 여러 과정을 거치게 되는데 발사체의 운반에서부터 발사장에서의 조립, 그리고 임무하중과의 최종 결합, 그리고 발사 당일의 여러 절차들을 수행하는데 많은 인력과 비용이 소요된다. 또한 전체 프로그램의 관리에서부터 비행과 임무 계획, 그리고 발사후의 비행경로 추적 및 관리 등의 제반 업무도 필요하다.

이와 같이 발사에 필요한 모든 업무들을 수행하기 위하여 소요되는 모든 비용을 합하여 운용비용이라고 하며, 운용비용에는 그 외에도 산화제와 연료와 같은 소모품 비용도 포함한다.

이러한 운용비용은 발사체의 크기에 따라 증가하게 되는데, 발사체의 크기는 임무중량의 크기와 비례하므로 Eq. 8과 같이 계산한다.

$$C_{op} = C_{op,b} \cdot \left(\frac{M_p}{M_{p,b}}\right)^{0.75} \quad (8)$$

여기에서 지수상수는 TRANSCOST의 비용모델에서 추정된 0.75로 정한다. 또한 기준 임무하중 $M_{p,b}$ 을 22톤으로 정하고, 이것을 발사하는데 필요한 운용비용 $C_{op,b}$ 를 적절하게 설정하기 위하여 20톤급 발사체인 Atlas V, Ariane 6, Falcon 9 등의 발사체에 대한 공개된 자료들을 바탕으로 정한다 [7-11].

운용비용도 발사횟수가 증가함에 따라 운용요원들의 경험과 기술이 늘어나고, 소요되는 소모품의 비용 등이 조금씩 감소하는 시너지 효과가 있기 때문에 Learning Curve Factor를 0.9 ~ 0.95 정도로 하여 이러한 효과를 감안한다.

재사용발사체의 경우에는 일반적인 운용비용은 크게 달라지지 않을 것으로 예상되나, 발사후

의 회수에 소요되는 비용은 적지 않을 것으로 예상된다. 따라서 재사용발사체의 운용비용은 Eq. 7에서 계산된 운용비용의 1.5배로 한다.

2.5 고정비용 및 보험비용

일반적으로 발사체를 제작하는 회사와 발사 서비스를 제공하는 회사가 다를 수도 있지만, SpaceX와 같이 발사체의 제작에서부터 발사에 이르기까지 전 과정을 제공하는 회사도 있다. SpaceX의 경우에는 생산설비 뿐 만 아니라 발사장도 자체적으로 보유하고 있기 때문에 생산설비와 발사장의 유지 및 보수에 소요되는 비용은 발사 유무와 관계없이 고정적으로 발생한다. 이 비용에는 생산설비와 발사장의 설비 구축을 위한 투자비용에 대한 감가상각비용도 포함되어야 하며, 생산설비와 발사장을 원활하게 유지하는데 필요한 최소 인력들의 인건비 등도 포함된다.

생산설비의 고정비용은 설비의 규모에 따라 달라지며, 설비의 규모는 제작되는 발사체의 크기에 따라, 그리고 연간 제작되는 생산댓수에 따라 달라진다. 따라서 이러한 효과를 고려하여 Eq. 9와 같이 계산한다.

$$C_{fm} = C_{fm,b} \cdot \left(\frac{M_p}{M_{p,b}}\right)^{0.63} \left(\frac{N_m}{N_{m,b}}\right)^{0.63} \quad (9)$$

여기에서 지수상수는 생산댓수 및 발사체의 크기가 3배로 늘어나면 생산설비의 규모가 2배로 커지게 된다는 가정 하에 0.63으로 정한다. 또한 생산설비의 고정비용에 대한 기준은 임무하중 22톤, 생산인원을 2교대로 해서 연간 생산댓수를 최대 18대로 하여 정한다.

발사장의 고정비용은 발사장의 규모에 따라 달라지는데, 이것은 연간 발사 횟수에 가장 크게 좌우되며, 부수적으로 발사체의 크기에 따라서도 달라진다. 따라서 발사장의 고정비용은 Eq. 10과 같이 계산한다.

$$C_{fl} = C_{fl,b} \cdot \left(\frac{M_p}{M_{p,b}}\right)^{0.2} \left(\frac{N_l}{N_{l,b}}\right)^{0.256} \quad (10)$$

여기에서 기준 임무하중은 22톤, 연간 발사횟수는 12회로 한다. 지수상수는 발사체의 크기가 2배로 커지면 발사장의 규모는 15% 정도 커지는 것으로 가정하여 0.2로, 연간 발사횟수가 180회 일 때 발사대의 수는 6대 정도는 되어야 함을 감안하여 발사장의 규모는 2배로 커져야 한다는 가정 하에 0.256으로 정한다.

보험비용은 발사체의 신뢰도 등을 고려하여 보험회사가 산정을 하나, 비용계산의 편의를 위하여 발사체의 평균 제작비용의 10%로 정한다.

3. 비용계산결과

재사용발사체와 기존발사체의 발사비용 분석을 위한 대상의 선정은 비용계산 결과를 검증하기에 가장 적절한 발사체여야 한다. 따라서 현재 재사용발사체로 성공적인 발사를 수행하고 있는 것은 SpaceX의 Falcon 9 밖에 없기 때문에 임무중량 22톤인 Falcon 9을 비용분석의 기준 발사체로 정하여 여러 논문과 인터넷상에서 공개된 자료를 바탕으로 비용분석에 필요한 계산 추정치들을 결정한다. 또한 발사체가 쏘아 올리는 위성의 궤도는 Falcon 9의 LEO 궤도인 202km 원궤도를 기준으로 하여 발사비용을 비교 분석한다.

재사용발사체의 최대 재사용횟수도 현재의 기술 능력을 감안하여 결정하며, 발사체의 크기가 동일하여도 재사용발사체의 경우에는 발사체의 회수 등에 필요한 연료와 산화제를 발사에 사용하지 못하기 때문에 임무중량은 30% 정도 줄어드는 것으로 가정하여 계산한다.

이상과 같이 발사비용의 계산에 필요한 여러 계수들의 추정치는 Falcon 9을 비롯하여 20톤급 유사 발사체들의 논문 및 인터넷상 여러 자료들을 참조하여 Table 2 및 Table 3과 같이 정한다[7-11].

임무중량 20톤 발사체로 연간 요구되는 발사횟수에 따라 각 발사체를 사용하여 위성을 쏘아 올리는데 소요되는 발사비용을 계산한 결과는 Fig. 1과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 연간 발사횟수가 적을 경우에는 재사용발사체의 발사비용이 더 비싸진다. 그러나 연간 발사횟수가 많

Table 2. Assumptions used in the calculations.

Number of Reusability	10
Turn-Around Time (Days)	30
Man Year Rate of USA @2019 (k\$)	302
Annual Average Rate of Inflation	2%
Amortization Period (Years)	10
Production Learning Curve Factor	0.87
Refurbishment/Production Cost	3%
Refurbishment Learning Factor	1.15
Operation Cost/Launch Cost	2.5%
Operation Learning Curve Factor	0.9
Factory Fixed-Cost/Annual Production	3%
Fixed-Cost of Site/Annual Launch Cost	6%

Table 3. Correction factors in the calculations.

	f_1	f_2	f_3	f_8
Development	1.0	0.25	0.7	1.0
Production	1.0	0.5	0.8	1.0

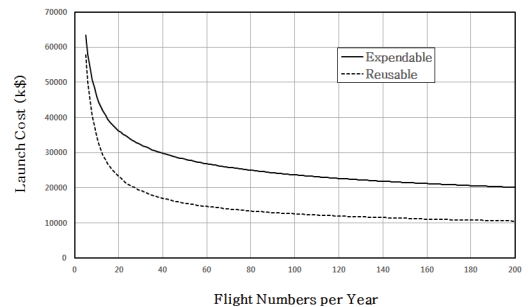


Fig. 1 Launch Cost per Flight.

아지면서 재사용발사체의 비용 효율성이 커지는 것을 볼 수가 있다. 현재의 세계 발사시장의 규모 측면에서 가장 현실적인 횟수로 생각되는 연간 20번 발사의 경우를 살펴보면, 재사용발사체의 발사비용이 기존 발사체와 비교하여 64% 정도로 약 23M\$가 되며, 연간 200번 발사하는 경우에는 기존발사체 대비 52%로, 발사당 비용이 10M\$ 정도로 낮아지는 것을 알 수가 있다.

현재 SpaceX의 Falcon 9 발사체가 연간 약 20대 정도 발사되는 것을 감안하여 발사비용을 검토해보면, 여러 공개된 자료 혹은 문헌에서 추정

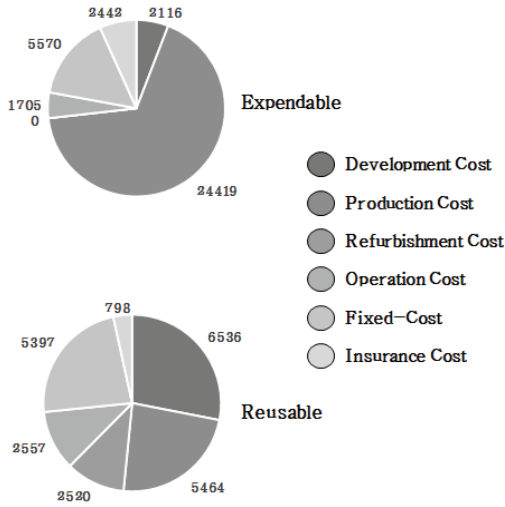


Fig. 2 Subsections of Launch Cost.

한 값과 유사한 수준으로 판단되므로 발사에 소요되는 ROM 비용을 추정하기 위하여 본 연구에서 제안된 계산방법은 적절한 것으로 결론지을 수 있다.

년간 20번 발사를 기준으로 발사비용을 6가지 항목으로 세분화하여 살펴보면 Fig. 2와 같다. 기존발사체의 발사비용에서는 발사체의 제작비용이 67% 정도로 가장 크게 차지하고 있으며, 생산설비와 발사장의 고정비용이 15% 정도를 차지한다. 반면에 재사용발사체의 경우에는 개발비용 28%, 제작비용 24%, 고정비용 23% 정도로 비슷한 몫을 차지하고 있으며, 재사용비용과 운용비용이 각각 11% 정도를 차지하고 있다.

발사비용을 임무하중의 중량당 비용으로 환산하여 나타낸 결과는 Fig. 3과 같다. 재사용발사체의 임무중량은 기존발사체 보다 30% 정도 줄어들기 때문에 재사용발사체의 비용 효율성은 발사당 비용보다 조금 떨어진다. 즉, 연간 20번 발사하는 경우에는 기존발사체 대비 92% 정도로 1,663 \$/kg, 연간 200번 발사하는 경우에는 75% 정도로 756 \$/kg이 되는 것을 알 수가 있다.

발사비용에 미치는 임무중량의 영향을 알아보기 위하여 임무중량 2톤급의 소형 발사체에 대한 발사비용을 비교 분석하면 Fig. 4와 같다. 이 경우 재사용발사체의 임무중량은 1.4톤이 된다.

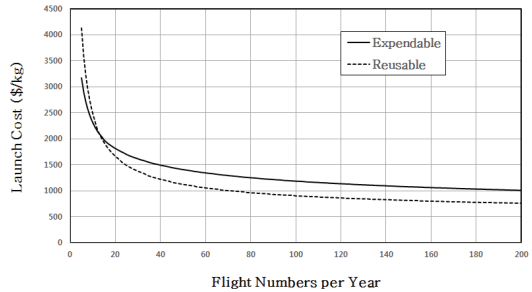


Fig. 3 Launch Cost per Payload Weight.

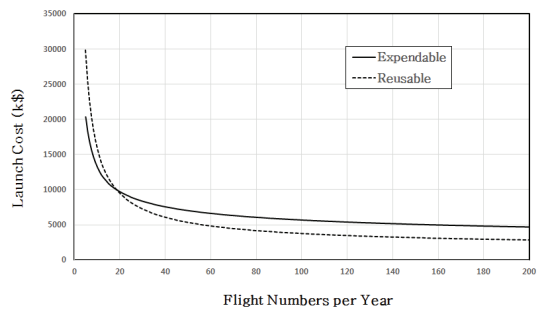


Fig. 4 Launch Cost per Flight (Small Payload).

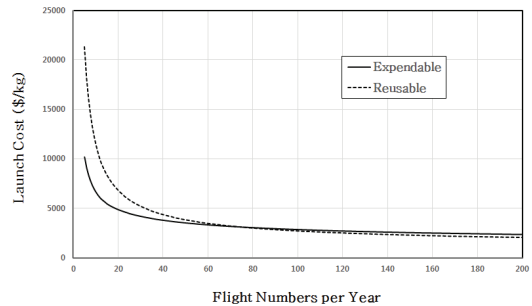


Fig. 5 Launch Cost per Payload Weight (Small Payload).

계산 결과를 보면 연간 발사횟수가 20회보다 적을 경우에는 재사용발사체의 발사비용이 더 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 소형 발사체일수록 재사용 발사체의 비용 효율성이 떨어진다는 것을 알 수가 있다. 이러한 효과는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 임무중량당 비용에서 더욱 뚜렷하게 나타난다.

임무중량 2톤급의 소형발사체의 경우에는 재사용 효과가 연간 70회 이상 발사를 하여야 나타나

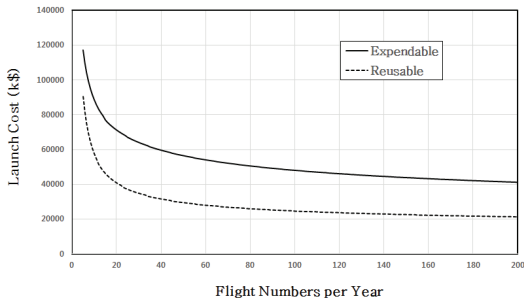


Fig. 6 Launch Cost per Flight (Large Payload).

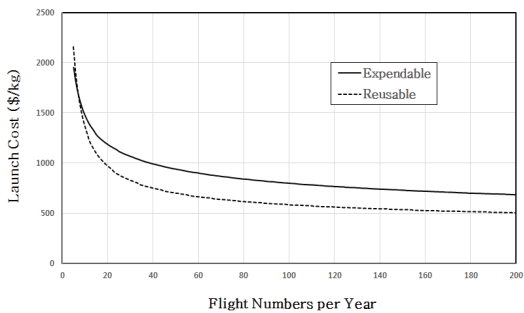


Fig. 7 Launch Cost per Payload Weight (Large Payload).

며, 연간 200회 발사의 경우에도 기존 발사체 대비 14% 정도의 비용 감소 효과밖에 없다는 것을 알 수가 있다.

임무중량이 초대형일 경우에 재사용발사체의 비용 효율성에 대하여 알아보기 위하여 임무중량 60톤에 대한 발사비용을 비교 분석한 결과는 Fig. 6과 같다.

계산결과로서 임무중량이 클수록 재사용에 따른 비용 효율성이 커짐을 알 수 있다. 임무중량이 클 경우에는 연간 발사횟수와 상관없이 발사당 비용은 재사용발사체가 기존 발사체에 비하여 항상 낮으며, 년 20회를 기준으로 보면 기존 발사체 발사비용의 57% 정도 수준인 41M\$ 까지 낮아진다. 또한 연간 200회로 발사횟수가 증가하면 발사비용은 21M\$까지 떨어진다.

임무중량이 60톤일 경우에 임무중량당 발사비용을 비교하면 Fig. 7과 같다. 재사용발사체의 경우에는 임무중량이 70%로 줄어들기 때문에 발사당 비용에 비해서는 기존 발사체와의 차이가

다소 적어지지만 임무중량이 커질수록 재사용에 따른 비용 효율성이 여전히 커진다는 것을 확인할 수가 있다.

4. 결 론

위성발사체의 발사비용은 공개된 자료가 아니기 때문에 쉽게 알기가 어려우나, 본 연구를 통하여 ROM(Rough Order of Magnitude) 발사비용을 추정하였다. 계산결과로서 알 수 있듯이, 현재 공개되어 있는 여러 자료들을 통하여 간접적으로 비교 검토해 본 바로는 추정한 발사비용이 상당히 적절한 수준임을 알 수 있다. 또한 다양한 크기의 임무중량을 위성궤도에 올리기 위하여 소요되는 발사비용을 비교 분석하기 위한 목적으로 사용하기에는 적합한 연구 결과이다.

재사용발사체와 기존 발사체의 발사비용에 가장 크게 영향을 미치는 것은 연간 발사횟수임을 연구결과를 통하여 알 수 있다. 또한 연간 발사횟수가 늘어나면 재사용발사체의 비용 효율성이 커짐을 알 수가 있다. 한편, 재사용발사체의 비용 효율성은 발사당 비용보다는 임무중량당 비용에서 다소 줄어든다는 것도 알 수 있다.

재사용발사체와 기존 발사체의 비용 효율성에 영향을 주는 또 하나의 중요한 요인으로는 발사체 임무중량의 크기를 생각할 수가 있다. 발사체의 임무중량이 적을 경우에는 즉, 발사체의 크기가 작을 경우에는 재사용발사체의 비용 효율성이 떨어지며, 임무중량이 클수록 재사용에 대한 따른 비용 효율성은 좋아진다. 다시 말해서 소형 발사체의 경우에는 연간 발사횟수가 매우 많지 않으면 재사용발사체보다는 재사용하지 않는 기존발사체의 발사비용이 더 저렴하다. 따라서 소형 발사체의 경우에 재사용의 개념을 적용하는 것은 신중하게 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 비교 검토하지 않았으나 비용 효율성을 결정하는 중요한 인자로서 재사용 가능한 횟수가 있다. 본 연구에서는 현재의 기술수준을 감안하여 재사용 횟수를 10번으로 가정하여 고정하였으나, 재사용 횟수가 많아짐에 따

라 발사비용은 점점 줄어들게 될 것이다. 그리고 재사용비용을 최대한 줄이는 것도 재사용발사체의 비용 효율성을 높이기 위한 중요한 요인이 될 것이다. 즉, 재사용하기 위하여 필요한 수리, 검사 및 시험 비용을 현재의 항공기 운용 수준으로 줄인다면 재사용발사체의 효율성은 매우 높아 질 것이다.

재사용발사체의 비용 효율성에 영향을 주는 다른 인자로서는 개발비용 및 제작비용이 있다. 재사용발사체를 개발하기 위하여 추가적으로 소요되는 비용과 재사용발사체를 제작하기 위하여 추가적으로 소요되는 비용이 너무 커지게 되면 비용 효율성이 급격하게 떨어지게 되고, 오히려 재사용발사체의 발사비용이 더 비싸지게 된다. 2000년대 초반까지만 하더라도 재사용발사체의 개발 및 제작에 대한 추가적인 비용을 너무 크게 예측함으로써 재사용발사체의 비용 효율성이 기존발사체와 비교하여 떨어진다는 연구 결과들을 많이 볼 수가 있다.

이상에서와 같이 발사체의 발사비용을 줄이기 위한 재사용발사체의 개념은 여러 비용 요인을 감안하여 신중하게 결정하여야 비용 효율성의 효과를 볼 수가 있다 것을 본 연구를 통하여 확인할 수 있다.

References

1. Harry W. Jones, "The Recent Large Reduction in Space Launch Cost," *48th International Conference on Environmental Systems*, Albuquerque, U.S.A., ICES-2018-81, July 2018.
2. "Criticism of the Space Shuttle Program," retrieved 12 Jan. 2019 from <https://en.wikipedia.org/wiki/>
3. Richard Webb, "Is It Worth It? The Economics of Reusable Space Transportation," *ICEAA 2016 International Training Symposium*, Bristol, UK, Oct. 2016.
4. "Comparison of orbital launcher families," retrieved 15 Jan. 2019 from <https://en.wikipedia.org/wiki/>
5. Dietrich E. Koelle, "Handbook of Cost Engineering and Design of Space Transportation Systems," TransCostSystems, Ottobrunn, Liebigweg, Germany, 2012.
6. "Falcon 9 Launch Vehicle NAFCOM Cost Estimates", retrieved 15 Jan. 2019 from <https://www.nasa.gov/pdf/>
7. Todd Matthew Herrmann, "A Critical Parameter Optimization of Launch Vehicle Costs," Master of Science Thesis, Department of Aerospace Engineering, University of Maryland, College Park, Maryland, U.S.A., 2006.
8. James R. Wertz, "Economic Model of Reusable vs. Expendable Launch Vehicles," 51st IAF Congress, Rio de Janeiro, Brazil, Oct. 2000.
9. Robert Tomanek and Jakub Hospodka, "Reusable Launch Space Systems," *Magazine of Aviation Development*, Vol. 6, No. 2, pp. 5-8, 2018.
10. James R. Wertz, "Responsive Launch Vehicle Cost Model," *AIAA 2nd Responsive Space Conference*, Los Angeles, CA, U.S.A., April 2004.
11. Greg J. Gstattenbauer, "Cost Comparison of Expendable, Hybrid, and Fully Reusable Launch Vehicles," Master of Science Thesis, Department of the Air Force, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, U.S.A., 2006.
12. D. E. Koelle and R. Janovsky, "Development and Transportation Costs of Space Launch Systems," *DGLR/CEAS European Air and Space Conference*, Berlin, Germany, Sep. 2007.
13. "Launch Vehicle Business Workshop," retrieved 5 Jan. 2019 from <https://thespaceshow.files.wordpress.com/>