

Research Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2020.24.2.035>

재사용발사체의 발사비용에 미치는 가격인자들의 민감도 분석

양수석^{a,*}

Sensitivity Analysis of Major Cost Parameters on the Launch Cost of Reusable Vehicles

Soo Seok Yang^{a,*}

^aPlanning & Policy Directorate, Korea Aerospace Research Institute, Korea

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

ABSTRACT

Recently the reusable launch vehicle is being a major trend in the worldwide space market, because a few commercial companies, especially SpaceX, are trying to cut down the launch price through developing and succeeding the reusable launch vehicles. However, there is still a big controversy about whether in view point of the launch cost which is more favorable between expendable and reusable. Therefore, a study and close examination is required for the launch cost in the early development phase of the reusable launch vehicle. In this study the sensitivity analysis is performed with respect to the major cost parameters which have great effects on the launch cost and price. The standard vehicle of this sensitivity analysis is the expendable vehicle having a payload 20 tons. The cost estimation relationships used in this calculation are referred from the commonly proven cost models such as TRANSCOST. The major cost parameters chosen in this study are as follows: development cost, production cost, refurbishment cost, and maximum reusable number.

초 록

최근 위성 발사체를 재사용하여 발사비용을 절감하려는 노력이 SpaceX를 비롯한 민간 기업에서 시도되어 많은 성공을 거둠으로써 재사용발사체가 발사체 시장의 큰 흐름이 되고 있다. 그러나 발사 비용 측면에서 재사용발사체가 유리한 것인가에 대하여서는 논란의 여지가 여전히 존재하며, 재사용 발사체에 대한 개발 초기 단계에서 이에 대한 면밀한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 재사용 발사체의 발사비용에 영향을 미치는 가격인자들에 대하여 발사비용의 민감도 분석을 수행한다. 민감도 분석의 기준은 임무중량 20톤의 소모성 발사체의 발사비용으로 하며, 발사비용의 계산에 사용된 비용추정관계식(CERs)은 TRANSCOST 등의 비용모델을 활용하여 계산한다. 주요 비용인자는 개발비용, 제작비용, 수리비용 및 재사용 가능 횟수로 한다.

Key Words: Sensitivity Analysis(민감도 분석), Launch Cost(발사비용), Reusable Launch Vehicle (재사용 위성발사체), Cost Parameter(가격인자)

Received 19 December 2019 / Revised 23 February 2020 / Accepted 26 February 2020

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

C_t	: Launch cost
C_d	: Annual amortization of development cost
L	: Number of flights per year
C_p	: Average production cost of one vehicle
N_{re}	: Number of reusability
$C_{p,1st}$: Production cost of first unit
N_p	: Number of production unit
r_1	: Learning curve factor of production
C_r	: Refurbishment cost
r_2	: Learning curve factor of refurbishment
$re1$: Condition 1 of reusability number
$re2$: Condition 2 of reusability number

1. 서 론

최근 SpaceX의 재사용발사체가 수차례 발사에 성공함으로써 발사체를 재사용하여 발사비용을 획기적으로 낮출 수 있다는 개념이 우주개발의 큰 흐름이 되고 있다. 민간기업으로서 SpaceX와 경쟁하고 있는 Blue Origin도 유인 우주체험을 위한 재사용발사체 New Shepard를 개발하여 상업비행을 시작할 준비를 하고 있으며, 그동안 재사용발사체에 부정적인 입장을 보인 유럽, 중국 등도 재사용발사체 개발 계획을 진행하며 우주 시장에서의 가격 경쟁에 박차를 가하고 있다.

그러나 재사용발사체를 이용하여 발사비용을 획기적으로 저감시킬 수 있다는 의견에 부정적인 견해도 여전히 존재하고 있다. 왜냐하면 재사용발사체를 개발하기 위해서는 개발비용이 기존 발사체보다 많이 소요된다. 또한 재사용 횟수에 따라 달라지겠지만, 재사용을 위한 재질의 변경 등으로 인해 재사용발사체의 제작비용도 당연히 증가된다. 이 뿐만 아니라 재사용을 하기 위해서는 수리비용이 필수적으로 수반된다. 재사용발사체의 최종적인 목표는 현재 운항중인 항공기와 같은 수준의 수리비용으로 발사체를 운용하는

것이지만, 현재 기술 수준으로는 적게는 초기 제작비용의 0.1%, 많게는 2~3%까지도 소요된다[1]. 또한 이 수리비용은 재사용 횟수가 늘어남에 따라 증가된다. 그리고 재사용발사체를 회수하기 위하여서도 상당한 운용비용이 소요되며, 회수에 실패하였을 경우에도 추가적인 손실이 발생한다. 따라서 이 모든 비용의 증가 요인들은 발사비용의 상승을 가져오는 중요한 인자들이 된다.

재사용발사체를 개발하기 위해서는 발사비용의 경쟁력을 확보하는 것이 무엇보다도 중요하며, 이를 위해서는 개발비용을 최대한 얼마까지 허용할지, 제작비용의 목표값을 얼마로 할지, 수리비용과 회수비용을 최소화하기 위해서는 어떻게 해야 할지 등에 대하여 기획 단계에서 면밀히 검토하여야 한다. 또한 무엇보다도 중요한 것이 재사용 가능 횟수의 목표값을 얼마로 하여 개발에 착수할 것인지도 결정하여야 한다. 재사용 가능 횟수가 개발비용, 제작비용 및 수리비용 등과 밀접하게 연관되어 있기 때문이다. 따라서 각각의 가격인자들이 발사비용에 미치는 민감도를 분석하는 것은 매우 중요한 연구가 된다.

2. 민감도 분석 방법

본 연구에서는 발사비용에 크게 영향을 미치는 주요한 비용인자들에 대한 민감도를 분석한다. 비용인자로는 개발비용, 제작비용, 수리비용 및 재사용 가능 횟수로서 총 4개를 설정한다. 대상으로 하는 발사체는 SpaceX사의 Falcon9과 유사한 20톤 임무중량의 발사체로 정하며, 발사비용의 계산은 TRANSCOST[1] 등의 가격추정식을 수정하여 사용한 S.S.Yang[2]의 가격 모델을 따른다.

각 비용인자에서 개발비용과 제작비용의 기준값은 20톤 임무중량의 소모성발사체의 개발비용 및 제작비용으로 설정하며, 수리비용의 기준값은 초기 제작비용의 0.5%, 그리고 재사용 가능횟수의 기준값은 10회로 한다. 또한 각 비용인자들의 변동폭은 기준값 대비 100%, 200%, 300%로 하여 각 비용인자의 변동에 따른 발사비용의 증감

Table 1. Baseline Values of Cost Parameters.

Cost Parameter	Baseline	Variations
Development Cost	\$380,165 k	100~300%
Production Cost	\$37,494 k	100~300%
Refurbishment Cost	\$187 k	100~300%
Reusability Number	10	100~300%

Table 2. Assumptions used in Calculations.

Turn-Around (Days)	30
Cost of USA 1 Man Year, \$k(@2019)	302
Annual Inflation Rate	2%
Development Amortization Time (Years)	10
Learning Curve Factor, Production Cost	0.87
Learning Curve Factor, Refurbishment	1.15
Learning Curve factor, Operation Cost	0.9
Operation Cost/Reference Launch Cost	5%
Factory Maintenance/Total Production cost	3%
Site Maintenance/Total Launch Cost	6%

을 살펴본다. 각 비용인자들의 기준값 및 변동폭은 Table 1과 같다.

3. 민감도 분석 결과

소모성 발사체 및 재사용발사체의 발사비용은 S.S. Yang[2]의 계산방법을 따라서 계산하며, 발사비용의 계산에 필요한 여러 계수들의 입력값은 관련 자료들을[3-9] 참조하여 Table 2와 같이 설정하여 사용한다.

3.1 개발비용에 대한 민감도 분석

재사용발사체의 개발비용이 소모성발사체의 개발비용과 동일하게 소요되는 경우를 기준값으로 하여 개발비용이 기준값의 100%, 200% 및 300%씩 추가적으로 소요되는 경우에 대하여 발사비용이 얼마나 증가하는가를 계산한 결과가 Fig. 1과 같다.

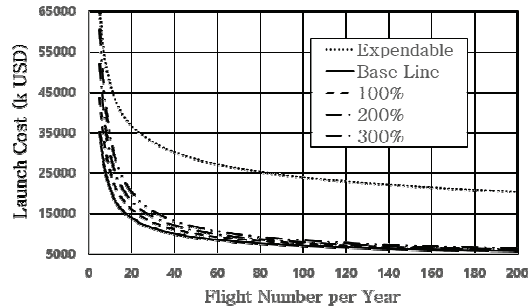


Fig. 1 Launch Costs with Development Cost Variations.

Table 3. Launch Costs Depending on Development Cost Variations (@ L = 5).

Development Cost	Baseline	+100%	+200%	+300%
Launch Cost (\$k)	35,078	43,543	52,008	60,472
Launch Cost Increment	-	24%	48%	72%

결과에서 볼 수 있듯이 연간 발사횟수가 적은 경우에는 개발비용이 발사비용에 상당히 큰 영향을 미치나 발사횟수가 늘어날수록 개발비용이 발사비용에 미치는 영향은 줄어든다.

연간 예상되는 발사횟수가 적어도 5회 이상은 되어야 재사용발사체를 개발한다고 가정하면, Table 3에서 보듯이 발사횟수 5회일 경우에 개발비용이 100% 증가하면 발사비용은 24%가 증가하며, 개발비용의 증가에 따라 비례하여 발사비용이 증가한다. 소모성발사체의 발사비용이 63,400천\$임을 감안하면, 연간 발사횟수가 5회밖에 되지 않은 경우에도 재사용발사체의 개발비용이 100% 증가하더라도 발사비용 측면에서는 재사용발사체가 훨씬 유리하다는 것을 알 수 있다. 그러나 개발비용이 300%이상 추가적으로 소요될 경우에는 소모성발사체의 발사비용보다 발사비용이 커지게 되어 발사비용 측면에서는 유리한 점이 없어진다.

한편, 연간 발사횟수가 늘어나는 경우에 대하여 개발비용의 증가에 따른 발사비용의 증가폭을 살펴보면 Table 4에서 보는 것처럼 비용 증

Table 4. Launch Costs with Flight Numbers
(@ Baseline & +100% Development Cost).

Flight Numbers	5	20	100	200
Launch Cost (\$k) @baseline	35,078	13,833	7,011	5,687
Launch Cost (\$k) @+100%	43,543	15,949	7,434	5,898
Launch Cost Increment (\$k)	8,465	2,116	423	211

가분이 점점 줄어들게 된다. 개발비용이 100% 증가할 경우, 연간 발사횟수가 5회일 때는 발사비용이 8,465천\$ 증가하나 발사횟수가 늘어나면서 증가분이 점차 감소하여 발사횟수가 200회일 때는 발사비용 증가분이 211천\$ 밖에 되지 않는다. 따라서 재사용발사체의 개발비용이 많이 소요된다고 하더라도 발사비용 측면에서는 소모성 발사체보다 훨씬 유리해진다.

개발비용은 다른 비용인자들과 연관되어있지 않기 때문에 개발비용 증가분에 대하여 물가상승률 2% 및 개발비용 상환기간 10년을 적용하면 연간 비용 상승분이 계산된다. 이것을 연간 비행횟수로 나누면 Eq. 1와 같이 개발비용 증가에 따른 발사비용 증가분이 추정된다.

$$\Delta C_l \approx \frac{\Delta C_d}{L} \tag{1}$$

3.2 제작비용에 대한 민감도 분석

재사용발사체의 제작비용이 소모성발사체의 제작비용과 동일하게 소요되는 경우를 기준으로 하여 제작비용이 기준값의 100%, 200% 및 300%씩 추가적으로 소요되는 경우에 대하여 발사비용이 얼마나 증가하는가를 계산한 결과가 Fig. 2와 같다.

결과에서 볼 수 있는 것은 개발비용의 경우와는 조금 다른 양상을 보이고 있는데, 제작비용의 증가로 인한 발사비용의 증가가 연간 발사횟수와는 관계없이 상당히 크게 나타난다는 것이다.

Table 5에서 보는 바와 같이 제작비용이 100%

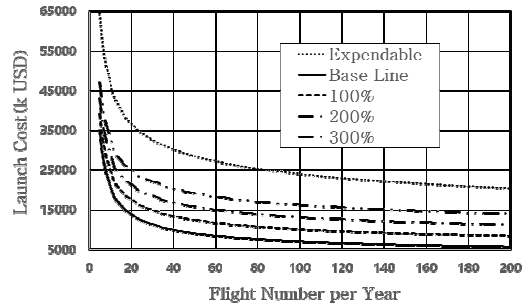


Fig. 2 Launch Costs with Production Cost Variations.

Table 5. Launch Costs with Flight Numbers
(@ Baseline & +100% Production Cost).

Flight Numbers	5	20	100	200
Launch Cost (\$k) @Baseline	35,078	13,833	7,011	5,687
Launch Cost (\$k) @+100%	39,084	17,595	10,064	8,449
Launch Cost Increment (\$k)	4,006	3,762	3,053	2,762

증가하는 경우에 대해서 살펴보면, 연간 발사횟수가 5회일 때는 제작비용의 증가에 따라 발사비용이 4,006천\$ 늘어나며, 발사횟수가 200회로 증가할 때의 발사비용 증가분은 2,762천\$로 다소 줄어들지만 여전히 크게 유지된다.

이 같은 결과를 수식적으로 추정해보면 다음과 같다. 우선, 제작비용의 증가에 따른 발사비용의 증가는 Eq. 2에서와 같이 재사용발사체의 최대사용 가능횟수에 따라 달라지게 되는데, 재사용 가능횟수의 기준값이 10회로 일정하므로 발사비용의 증가분은 평균 제작비용 상승분의 9% 정도로 나타난다.

$$\Delta C_l \approx \frac{\Delta C_p}{N_{re} + 1} \tag{2}$$

또한 발사횟수의 증가에 따라 발사비용의 증가분이 다소 감소하는 것은 연간 발사횟수를 만족하기 위해서 운영되어야 하는 편대의 댓수가

늘어나야 하고, 증가된 편대 댓수를 제작하는 경우에는 Eq. 3에서 보는 바와 같이 증가된 댓수의 제작에 따른 Learning Curve Factor의 효과로 평균 제작비용 상승분이 줄어들기 때문이다. 이 외에도 제작비용의 증가에 따라 수리비용이 증가하고, 제작단가의 상승에 따른 보험비용의 상승도 다소간의 영향을 미친다.

$$\Delta C_p \approx \frac{\sum_{n=1}^{N_p} \Delta C_{p,1st} \cdot n^{\frac{\log(r_1)}{\log 2}}}{N_p} \quad (3)$$

3.3 수리비용에 대한 민감도 분석

재사용발사체가 발사비용 측면에서 경쟁력을 가지기 위해서는 발사체의 성공적인 회수가 전제되어야 하고, 회수비용이 가능한 적게 들어야 한다. 또한 회수된 발사체는 재발사 가능성에 대한 점검 및 수리가 행하여져야 하는데 이에 소요되는 비용도 가능한 적게 들어야 한다. Space Shuttle이 개발시에 제시한 발사비용을 만족시키지 못한 이유에는 재사용에 따른 수리비용 등이 너무 과도하게 소요된 것도 큰 몫을 차지한다.

본 연구에서는 초기 제작비용의 0.5%인 187천 \$을 수리비용의 기준값으로 설정하며, 수리비용이 100%, 200% 및 300%가 추가적으로 소요되는 경우에 대하여 발사비용이 얼마나 증가하는가를 계산한다. B747 항공기의 경우에 수리비용이 0.006% 정도임을 감안할 때 재사용발사체 수리비용의 기준값은 매우 크게 설정하였지만, 이것은 재사용발사체의 현재 기술이 아직 충분히 상용화되기 이전의 단계이기 때문이다.

수리비용이 증가함에 따라 발사비용이 증가하는 것을 발사횟수에 따라 나타내면 Fig. 3과 같다. 여기에서 좌표의 축은 모두 로그함수로 표현하며, 이것을 정량적으로 나타내면 Table 6과 같다.

계산결과에서 알 수 있듯이, 수리비용이 187천 \$ 증가하면 발사비용은 257천\$ 증가하며, 이 증가분은 연간 발사횟수에 관계없이 일정하다. 즉, 수리비용 증가분의 약 140% 정도가 발사비용의 증가로 나타난다. 여기에서 발사비용의 증가분이 100%보다 큰 이유는 Eg. 4에서와 같이 재사용

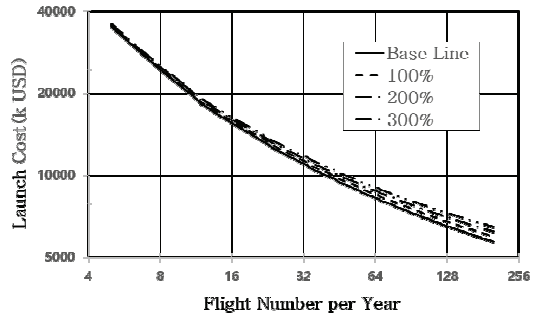


Fig. 3 Launch Costs with Refurbishment Cost Variations.

Table 6. Launch Costs with Flight Numbers (@ Baseline & +100% Refurbishment Cost).

Flight Numbers	5	20	100	200
Launch Cost (\$k) @ Baseline	35,078	13,833	7,011	5,687
Launch Cost (\$k) @+100%	35,335	14,089	7,267	5,943
Launch Cost Increment (\$k)	257	257	257	257

횟수가 늘어남에 따라 수리비용도 같이 조금씩 증가하기 때문이다.

$$\Delta C_t \approx \frac{\sum_{n=1}^{N_m} \Delta C_r \cdot n^{\frac{\log(r_2)}{\log 2}}}{N_{re}} \quad (4)$$

3.4 재사용 횟수에 대한 민감도 분석

재사용발사체를 개발할 때는 재사용 가능한 횟수를 늘리기 위해서 개발자는 최대한 노력을 할 것이다. 현재 SpaceX Falcon9의 최대 재사용 가능 횟수는 약 10회 정도로 알려져 있으며, 다음 발사체의 개발시에는 이 회수를 대폭 증가시키겠다고 공언하고 있다.

그러나 재사용 횟수를 늘리기 위해서는 개발비용이 추가적으로 소요될 것이며, 제작비용도 증가하고, 재사용 수리비용도 증가하기 때문에 재사용횟수의 개발 목표를 얼마로 설정하는 것이 적절한가는 초기 단계에서 충분히 검토되어야 한다.

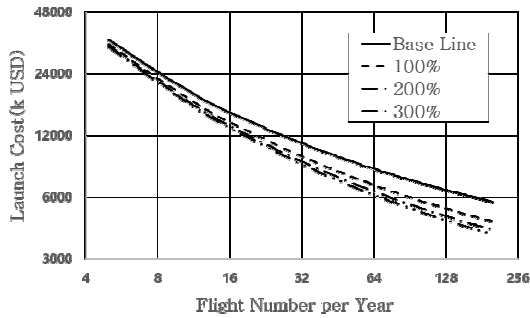


Fig. 4 Launch Costs with Reusability Variations.

Table 7. Launch Costs Depending on Reusability Variations (@ L = 5).

Reuse Numbers	Baseline	+100%	+200%	+300%
Launch Cost (\$k)	35,078	33,341	32,737	32,434
Launch Cost Decrement	-	5.0%	6.8%	7.5%

본 연구에서는 재사용 횟수의 기본값을 10회로 설정하며, 이 값이 100%, 200% 및 300% 추가적으로 증가할 경우 발사비용이 어떻게 달라지는가를 계산하여 발사횟수에 따라 나타낸 결과가 Fig. 4와 같다. 그림의 좌표 축은 모두 로그함수로 표시되어 있다.

발사횟수가 5회일 경우에 대하여 재사용발사횟수의 증가에 따라 발사비용이 어떻게 변하는지를 정량적으로 나타내면 Table 7과 같다. 재사용 횟수가 기준값인 10회에서 20회로 늘어나는 경우, 발사비용은 35,078천\$에서 33,341천\$로 줄어든다. 즉, 재사용횟수가 100% 증가함에 따라 발사비용이 약 5.0% 감소하는 효과가 나타난다.

이러한 발사비용 감소효과는 재사용횟수가 추가적으로 100%씩 증가함에 따라 6.8%, 7.5%로 나타나는데 이것은 Eq. 5를 통하여 알 수 있다.

$$\Delta C_t \approx \frac{C_{p,rel}}{N_{rel} + 1} - \frac{C_{p,rel}}{N_{rel} + 1} \quad (5)$$

또한 연간 발사횟수에 따라 발사비용 감소분

Table 8. Launch Costs with Flight Numbers (@ Baseline & +100% Reusable Numbers).

Flight Numbers	5	20	100	200
Launch Cost (\$k) @Baseline	35,078	13,833	7,011	5,687
Launch Cost (\$k) @+100%	33,341	12,211	5,753	4,563
Launch Cost Decrement (\$k)	1,737	1,622	1,258	1,124

이 어떻게 달라지는가를 나타내면 Table 8과 같다. 결과에서 볼 수 있듯이 재사용 횟수가 증가함에 따라 발사비용이 감소하는 효과가 연간 발사횟수가 늘어남에 따라 조금씩 줄어든다.

이것은 Eg. 6에서와 같이, 연간 발사횟수가 늘어나는 경우에는 이를 만족시키기 위해서 재사용 가능 횟수를 고려하여 운용편대의 수가 늘어나야 하는데, 재사용 가능횟수가 증가함에 따라 운용해야할 편대의 댓수는 줄어들게 되고, 따라서 줄어든 운용 댓수를 제작함에 따라 Learning Curve Factor의 효과로 평균 제작비용은 증가하는 효과가 생기기 때문에 발사비용 감소분이 조금씩 줄어들게 된다.

$$C_{p,rel} \approx \frac{\sum_{n=1}^{N_{rel}} C_{p,1st} \cdot n^{\frac{\log(r_r)}{\log 2}}}{N_{p,rel}} \quad (6)$$

또한 재사용 가능횟수가 증가하는 경우에는 재사용에 따른 수리비용이 조금씩 증가되어 평균 재사용 수리비용도 커지게 되어 발사비용 감소 효과가 상대적으로 감소한다.

4. 결 론

지금까지 살펴본 재사용발사체의 발사비용에 영향을 미치는 가격인자들에 대한 민감도를 계산한 결과를 종합하면 다음과 같다.

첫 번째 가격인자로서 개발비용이 재사용발사체의 발사비용에 미치는 영향은 연간 발사횟수

에 따라 크게 다르게 나타난다. 즉, 발사횟수가 적을 경우에는 개발비용의 증가에 따른 발사비용의 민감도가 커지만, 발사횟수가 커질수록 민감도는 줄어든다. 따라서 재사용발사체를 개발할 경우에는 예상되는 연간 발사횟수를 면밀히 검토하여 투입할 개발비를 산정하여야 할 것이다.

두 번째 가격인자로서 제작비용이 재사용발사체의 발사비용에 미치는 영향은 연간 발사횟수와는 관계없이 상당히 크게 나타난다. 또한 제작비용의 증가가 발사비용에 미치는 민감도는 재사용 가능횟수가 커짐에 따라 점차 작아진다. 그러므로 연간 발사횟수가 점차 늘어가는 발사시장의 향후 상황을 고려한다면, 재사용 가능횟수가 크게 늘어나지 않는 현재의 기술 수준 하에서는 제작비용은 재사용발사체의 가격 경쟁력에 매우 중요한 가격인자라고 판단된다.

세 번째 가격인자로서 수리비용이 재사용발사체의 발사비용에 미치는 영향은 연간 발사횟수에 관계없이 일정하게 나타난다. 또한 수리비용 자체가 커지 않기 때문에 발사비용에 전체적으로 미치는 영향은 적지만, 수리비용 대비 발사비용의 민감도는 100% 이상으로 크다. 따라서 재사용발사체의 활용도가 현재의 항공기 수준으로 크게 늘어날 경우에는 발사비용에 가장 큰 영향을 주는 가격인자가 될 것으로 판단된다.

마지막으로 재사용 가능횟수가 발사비용에 미치는 영향은 여러 가지 요인에 따라 다소 복잡하게 나타난다. 재사용발사체를 이용한 발사가격의 파격적인 인하는 한번 사용한 발사체를 버리지 않고 재사용하는 것에 있으며, 또한 얼마나 많이 재사용할 수 있는가가 발사비용 축소의 핵심적인 요인이다. 그러나 재사용 가능횟수의 증가에 따른 발사비용 감소를 민감도 관점에서 보면, 재사용 가능횟수를 100회에서 200회로 늘리면서 발생하는 발사비용 감소분이 재사용 가능횟수를 10회에서 20회로 늘리면서 생기는 감소분의 약 1/10 밖에 되지 않는다. 또한 연간 발사횟수가 늘어나면서 재사용 가능횟수에 대한 민감도는 약해진다. 따라서 재사용발사체의 발사비용 민감도와 연관되어 있는 여러 요인들 즉, 초기 제작비용, 제작에 따른 Learning Curve

Factor, 연간 발사횟수, 운용편대 댓수 등을 잘 고려하여 재사용 가능횟수를 설정해야 한다.

References

1. Dietrich E. Koelle, "Handbook of Cost Engineering and Design of Space Transportation Systems," TransCostSystems, Ottobrunn, Liebigweg, Germany, 2012.
2. S.S. Yang, "Impacts of Payload Weights on the Cost Effectiveness of Reusable Launch Vehicles," J. of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 23, No. 4, pp. 1-9, 2019.
3. James R. Wertz, "Responsive Launch Vehicle Cost Model," AIAA 2nd Responsive Space Conference, Los Angeles, CA, U.S.A, April 2004.
4. James R. Wertz, "Economic Model of Reusable vs. Expendable Launch Vehicles," Rio de Janeiro, Brazil, 51st IAF Congress, Oct. 2000.
5. "Criticism of the Space Shuttle program," retrieved 12 Jan. 2019 from <https://en.wikipedia.org/wiki/>
6. "Falcon 9 Launch Vehicle NAFCOM Cost Estimates", retrieved 15 Jan. 2019 from <https://www.nasa.gov/pdf/>
7. 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.
8. 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.

9. 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.