

한국형 기동무기체계 양산비 비용추정관계식 개발에 관한 연구

이두현^{1*} · 김각규²

¹방위사업청 분석시험평가국 사업분석과, ²육군 분석평가단

A Study on Developing a CER Using Production Cost Data in Korean Maneuver Weapon System

Doo-Hyun Lee¹ · Gak-Gyu Kim²

¹Analysis, Test and Evaluation Bureau Program Analysis Division

²Center for Army Analysis and Simulation at ROK army

■ Abstract ■

In this paper, we deal with developing a cost estimation relationships (CER) for Korean maneuverable weapons systems using historical production cost. To develop the CER, we collected the historical data of the production cost of four tanks and five armored vehicles. We also analyzed the Required Operational Capability (ROC) of the weapons systems and chose cost drivers that can compare operational capabilities of the weapons systems. We used Forward selection, Backward selection, Stepwise Regression and R^2 selection as the cost drivers which have the greatest influence with the dependent variables. And we used Principle Component Regression, Robust Regression and Weighted Regression to deal with multicollinearity and outlier among the data to develop a more appropriate CER. As a result, we were able to develop a production cost CER for Korean maneuverable weapons systems that have the lowest cost errors. Thus, this research is meaningful in terms of developing a CER based on Korean original cost data without foreign data and these methods will contribute to developing a Korean cost analysis program in the future.

Keywords : CER, ROC, Forward Selection, Stepwise Regression, R^2 Selection, Multicollinearity, Outlier

1. 서 론

한국의 무기체계는 대분류로 총 8대 무기체계로 분류되며 그 중 기동분야는 기동지원, 전차, 장갑차, 전투차량으로 나눌 수 있다. 이 중 기동무기체계(중분류)사업은 전차와 장갑차가 해당된다[1]. 이러한 전차와 장갑차는 이미 1970년대부터 독자적인 기술을 바탕으로 지속적으로 개발되고 있으며, 최근에는 K-2 전차와 K-21 장갑차가 개발되어 세계적인 성능을 과시하고 있다. 이처럼 국내 자체 개발되고 있는 무기체계가 점차 증가하는 추세 속에서 개발 초기에 향후 개발되어질 유사 무기체계에 대한 비용(연구개발비, 양산비, 운영유지비) 예측은 제한된 국방예산 환경에서 상당히 중요하다고 볼 수 있다.

현재 한국은 방위사업청, 국방과학연구소(이하 국과연) 등에서 비용분석을 통해 비용을 예측하고 있으나 전산모델에 의한 분석 방법이 있어서는 국내 비용분석 전산모델이 부재하여 미국의 상용 전산 모델을 통해 분석하고 있는 실정이다. 그러나 미국 전산 모델은 그 안에 포함되어 있는 수식의 변수에 대한 데이터가 모두 미국의 방산 환경과 경험적 요소들이 반영되어 있어 한국 무기체계 개발 환경과 상이한 점들이 많다. 특히 미국 전산 모델내의 저장되어 있는 수식은 중량과 제조복잡도(Manufacturing Complexity for Structure, MCPLX)가 핵심 변수로서 적용되고 있으며 [2], 제조복잡도는 과거 미국에서 항공기를 생산하며 각 부품에 대한 정밀도와 기술적 노력 등을 데이터화하여 축적한 결과물으로써 미국이 아닌 타 국가에서는 방산환경과 기술력에 차이가 있어 이를 바탕으로 도출된 값의 신뢰성이 떨어진다고 볼 수 있다. 따라서 한정된 국방예산 내에서 개발 초기에 보다 정확한 비용 예측값을 얻기 위해서는 국내 환경에 맞는 수식 개발이 필수적이라 할 수 있다.

비용분석 방법에는 공학적추정법, 모수추정법, 상

용모델을 이용한 추정법, 전문가추정법, 유사장비 추정법 등이 있는데 개발초기단계에서 부품단위 원가가 확정되지 않고, 관련 유사장비 실적이 없는 경우를 고려할 때 회귀분석을 이용하는 모수추정법(Parametric Cost Estimating)이 가장 유용하게 사용되고 있다[2].

모수추정법은 비용이 종속변수이고, 기타 여러 가지 무기체계의 성능 척도가 독립변수로 적용되어 도출되는 회귀식이므로 회귀식의 모형 적합도가 높을 경우 미래에 추가적으로 개발될 무기체계의 성능 척도만 예측하면 비용을 쉽게 도출할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 모수추정법을 이용하여 장갑차와 전차에 대한 양산 실적자료를 바탕으로 비용추정관계식(Cost Estimation Relationships, 이하 CER)을 개발하는데 중점을 두었다. 본 연구에서 수집한 장갑차 및 전차는 총 9종의 무기체계로 <표 1>과 같다.

<표 1> 분석 대상 무기체계

구분	무기체계
전차	K-1, K1A1, K-2, K-1구난전차
장갑차	K200, K200A1, K242, K281, K-21

<표 1>의 9종 무기체계의 양산비 실적자료는 각각의 무기체계를 양산한 방위사업 업체를 통해 수집하였으며, 비용자료 수집 범위는 무기체계 정산가를 기준으로 본 연구에서 정의한 기동무기체계 WBS(Work Breakdown Structure)에 대한 각 구성품 비용과 이들의 합계인 총 양산단가를 수집하였고, 무기체계 양산시 비용절감 요인이 될 수 있는 학습률 및 총 양산수량을 수집하였다. 또한 CER 수식에 포함되는 무기체계 성능을 확인하기 위해 육군에서 발간되는 기술교범 및 양산 업체를 통해 각 무기체계의 세부적인 성능자료를 수집하여 적용하였다. 이러한 성능자료의 활용은 제 4장에서 자세히 다루었다.

2. 기존연구 고찰

기동무기체계에 대한 기존문헌을 보면, 한현진[3]은 미국 전산 모델인 PRICE 모델을 활용하여 연구개발비 및 양산비에 대한 비용을 예측하는 방법을 연구한 사례가 있었다. 그러나 이러한 미국 전산 모델 기반 비용분석은 서두에 언급했듯이 국내 방산환경과 다소 상이한 수식이므로 국내 방산환경에 적용하기엔 신뢰성이 낮다. 정태균[5]은 이러한 PRICE 모델의 비용추정 결과와 실제 정산된 결과를 비교하여 모델의 정확도를 평가하고, 추정치의 정확도를 향상시키기 위한 방법으로 비용추정 결과에 핵심적으로 영향을 주는 기계부품 제조복잡도(MCPLXS: Manufacturing Complexity of Structure)와 전자부품 제조복잡도(MCPLXE: Manufacturing Complexity of Electronics)에 대하여 정산자료를 기초로 보정(calibration)을 수행하였다. 이러한 보정방법은 MCPLX를 국내 실정에 맞는 수치로 전환하여 사용할 수 있는 방향을 제시하였으나 근본적으로 미국의 방산 데이터로 제작된 PRICE 모델의 한계는 지속적으로 남아있다. 순수 국내 자료를 바탕으로 한 연구에서 어원재[7]는 전자 2종, 장갑차 2종에 대해 연구개발비를 총 비용 측면에서 연구한 사례가 있었다. 이 연구에서는 4개의 기동무기체계에 대한 실적자료를 바탕으로 연구개발비 총 비용을 종속변수로 정의하고 작전운용성능(Required Operational Capability, 이하 ROC) 설정 기준과 관련된 성능변수를 독립변수로 정의하여 식을 도출하였다. 이 연구에서는 WBS를 세분화하지 않고 무기체계의 총원가 측면에서 접근했다는 점과 실적자료 수집에 한계가 있어 4개 무기체계에 대한 수식을 도출했다는 점에서 추정되는 값의 신뢰성에 다소 한계가 있다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 추정값의 신뢰성을 보완하기 위해 보다 많은 양산비 실적자료를 바탕으로 기동무기체계 표준 WBS를 제시하고 이에 대한 양산비 CER을 개발하였다.

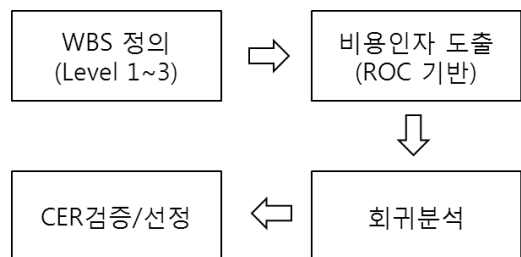
3. 이론적 배경

3.1 CER 개념

모수추정법의 핵심은 CER을 도출하는 것이다. CER은 회귀분석을 적용하여 종속변수와 하나 혹은 그 이상의 독립변수로 정의하여 회귀식을 구성하는 것을 말한다. CER은 $Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon$ 의 형태로 도출되며, 여기서 Y 는 종속변수이고, X_1, X_2, \dots, X_k 는 독립변수이다[6]. 따라서 변수간의 다중공선성이나 이상치 등을 분석하여 상황에 맞는 적절한 회귀분석 기법을 적용하여 각 독립변수의 계수인 β_i 를 도출함으로써 CER이 완성된다.

3.2 CER 개발 절차

CER을 개발하기 위해서는 먼저 표준화된 WBS가 정의 되어야 한다. WBS는 무기체계의 특성과 형상을 고려하여 Level 1~3 혹은 그 이상의 하위 Level까지 분류 할 수 있다. 각 Level은 무기체계의 형상과 부품단위, 그리고 투입되는 비용을 고려하여 정의하게 된다. Level 1은 모든 비용이 종합된 총 원가 측면에서 정의를 하고, Level 2에서는 무기체계의 형상부분과 이를 제조, 운용하기 위한 기타 비용을 고려하여 정의하며, Level 3부터는 Level 2의 형상단위 Level을 구성하고 있는 부품단위를 고려하여 세부 하위 단계로 구분되어진다[6].



[그림 1] CER 개발 절차

[그림 1]과 같이 WBS 정의 후에는 ROC 설정 기준을 바탕으로 무기체계의 특성과 성능을 비교할 수 있는 비용인자를 도출한다. 이러한 비용인자를 회귀식의 독립변수로 정의하고, 비용을 종속변수로 정의하여 변수선택의 과정을 통해 비용에 가장 연관성이 높은 독립변수를 찾아 회귀분석을 통해 수식을 개발한다. 변수선택 방법에는 Forward Selection, Backward Selection, Stepwise Selection이 있으며, 이 중 Forward Selection은 여러 독립변수 중 종속변수에 가장 연관이 높은 변수로 먼저 식을 구성하고, 그 다음 영향력이 높은 변수를 하나씩 모형에 포함시켜 연관성을 확인하여 변수를 선택하는 방법이며, Backward Selection은 Forward Selection과 반대되는 방법으로 모든 변수를 모형에 포함시킨 후 영향력이 가장 작은 변수부터 하나씩 제거해 나가는 방법이다. Forward Selection은 한번 선택된 변수는 끝까지 모형에 남게 되고, Backward Selection은 한번 제거된 변수는 다시 모형에 포함될 수 없기 때문에 이러한 점을 보완하기 위해 개발된 방법이 Stepwise Selection이다. Stepwise Selection은 기본적으로 Forward Selection으로 시작하여 모형을 구성한 후 Backward Selection의 방법을 적용하여 모든 변수를 하나씩 제거해 나가면서 최적의 모형을 찾고 가장 영향력이 높은 변수만을 선택하는 방법이다[3]. 본 연구에서 Backward Selection은 Forward Selection과 변수선택의 결과가 차이가 없이 나타나 Stepwise Selection을 주로 사용하여 변수를 선택하였으며, 부수적으로 Forward Selection을 적용하였다.

무기체계의 성능을 독립변수로 정의할 경우에는 다중공선성이 쉽게 발생할 수 있다. 가령 중량과 속도가 변수일 경우 중량이 높을수록 속도가 낮은 경우가 많기 때문에 이러한 성능 변수는 상호 밀접한 연관성을 갖기 마련이다. 즉, 이러한 다중공선성이 발생할 경우 하나의 독립변수가 다른 독립변수에 영향을 주게 되어 올바른 회귀분석의 계수를 도출하는데 제한이 된다. 따라서 다중공선성 여부를 정확하게 판단하여 주성분 회귀분석 등의 방법을

통해 다중공선성의 선형적 연관성을 완화하기 위한 노력이 반드시 수반되어야 한다. 다중공선성은 변수들의 분산팽창지수(Variation Inflation Factor, 이하 VIF)를 사용하여 진단할 수 있다. VIF의 개념은 추정 회귀계수들의 분산이 독립변수들이 선형으로 연관되어 있지 않을 때와 비교하여 얼마나 팽창되었는지를 측정하는 기준이며, VIF의 식은 다음과 같다[3].

$$VIF_k = \frac{1}{(1-R_k^2)}, \quad k=1, 2, \dots, p \quad (R_k^2 : \text{결정계수}) \quad (1)$$

k : 변수 조합의 수, p : 독립변수의 수

이러한 VIF는 최대 VIF가 10 이상이거나 혹은 평균 VIF가 1 이상일 경우 다중공선성이 존재하는 것으로 판단하여 다중공선성을 진단할 수 있다[3].

다중공선성이 존재하는 데이터는 주성분 회귀분석(Principal Components Regression, PCR)을 통해 변수간의 상관관계를 최소화하여 회귀식 도출이 가능하며, 이상치가 존재할 경우에는 제거하거나 혹은 로버스트 회귀분석(Robust Regression)을 이용하여 분석이 가능하다. 이분산성은 선형회귀모형의 기본 가정사항인 등분산성(Homoscedasticity)을 위배하는 것으로 잔차들이 Random하게 분산되어 있지 않고 일정한 패턴을 형성하는 경우를 말한다. 이는 잔차의 산점도를 통해 식별이 가능하며, 이분산성이 존재할 경우 이를 완화시킬 수 있는 방법으로 가중회귀(Weighted Regression)을 사용할 수 있다[3].

회귀분석을 통해 CER이 도출되면 여러 가지 검증 척도를 이용하여 CER을 검증하고 사용 가능 여부를 판단해야 한다. 본 연구에서 적용하는 검증 기준은 ISPA (International Society of Parametric Analysts)에서 제시하는 통계검증 기준값을 적용하였으며, 그 중 $R_{adj}^2 \geq 0.6$ 은 정확한 예측값을 요구하는 비용분석의 목적에 맞게 좀 더 엄격히 적용하여 CER을 검증하였다. 따라서 본 연구에서 적용한 검증기준은 $R_{adj}^2 \geq 0.8$, $p\text{-value} \leq 0.05$, MMRE

(Mean Magnitude Relative Error) ≤ 0.25 , $PRED(0.25) \geq 0.75$, $RMSE(\text{Rooted Means Square Error})$ 는 가장 낮은 값을 적용하였다[10].

3.3 학습효과 적용

학습효과란 제품의 생산 시 반복공정으로 인해 제품을 생산할 때마다 작업의 숙련도가 증가하여 노무공수가 감소하는 현상을 말하며 학습률은 학습효과를 나타내는 수치로서 생산수량이 2배 증가할 때 단위 시간당 노무공수가 감소하는 비율로서 정의된다. 총 양산비는 양산수량에 따라 금액이 달라질 수 있으므로 양산비 CER을 개발하기 위한 기초자료는 학습률이 반영되지 않은 가장 초기 투입된 초도양산품의 양산단가를 도출해서 활용해야 한다. 따라서 초도 양산품 양산단가를 산출하기 위해 아래와 같은 학습률 공식을 적용한다[4].

$$Y_N = T_1 N^b \quad (2)$$

위 식에서 Y_N 은 생산품 N 까지의 누적 평균 노무공수이며, T_1 은 초도양산품의 노무공수, N 은 누적 생산 대수이고 b 는 학습곡선지수($2^b = \text{학습률}$)이다. 초도 양산품 양산단가 도출을 위해서는 먼저 b 값을 구해야하며, ' $2^b = \text{학습률}$ ' 양변에 \log 를 취해 아래와 같이 변형한다.

$$b = \log(\text{학습률}) / \log(2) \quad (3)$$

위와 같이 b 값이 도출되면 이를 식 (2)에 적용하여 초도 양산품 양산단가(T_1)를 구할 수 있다[6].

4. 기동무기체계 양산비 CER 개발

4.1 일반화 WBS 정의

기동무기체계의 WBS는 미 국방성(Department

of Defense, DoD)의 비용추정 가이드북인 MIL-HDBK-881[9]과 국과연 및 업체의 전문가 의견을 종합적으로 반영하였다. 본 연구는 무기체계의 성능을 독립변수로 활용하기 때문에 Level 4 이상 하위 품목의 비용에 대해서는 중량 외에는 해당 품목을 대표할 수 있는 비용인자를 선택하기 제한된다. 따라서 이러한 점을 고려하여 Level 3까지의 WBS에 대한 CER을 개발하였으며, 이를 위한 기동무기체계 양산비 일반화 WBS는 <표 2>와 같다.

<표 2> 기동무기체계 양산 WBS

Level 1	Level 2	Level 3
기동 무기체계	1.1 차체	1.1.1 방호구조
		1.1.2 사격통제장치
		1.1.3 포탑
		1.1.4 현수장치
		1.1.5 동력장치
		1.1.6 보조장치
	1.2 체계공학/사업관리	
	1.3 훈련장비	
	1.4 종합군수지원	

<표 2>에서 1.1 차체에 해당하는 6개 항목(방호구조, 사격통제장치, 포탑, 현수장치, 동력장치, 보조장치)은 CER로 개발되는 항목이며, 1.2~1.4에 해당하는 항목은 비용요소 추정식(Factor Estimation Relationships, 이하 FER)으로 나타나는 항목이다[6]. FER에 해당하는 항목은 연구개발 및 양산 단계에서 투입되는 기술적, 인력적 요소들로서 이는 연도별, 해당 기관 및 업체별로 상이함으로 실제 개발 및 양산단계에서 정확한 값이 확인되거나 예측값을 도출하기 위해서는 각 무기체계의 실적자료를 바탕으로 CER로 도출되는 항목 대비 전체비용에서 차지하는 비율로 정의된다.

4.2 비용인자 도출

비용인자는 육군의 ROC 설정기준에 따라 각 무기체계의 성능을 비교할 수 있는 요소를 선별하여 총 27종의 비용인자를 <표 3>과 같이 도출하였다.

1) $PRED(l)$: Prediction at level l .

〈표 3〉 기동무기체계 비용인자

구분	비용인자
특성변수	길이, 전투중량, 주포구경/포신형태, 유효사거리, 엔진중량, 엔진출력, 최대속도, 최대토크, 항속거리, 연료탱크용량, 보기륜 수, 엔진형태(기통), 호통과 능력, 장애물통과, 조준경탐지범위, 사격통제컴퓨터 중량, 레이저 거리측정기 범위
가변수	현수장치형태, 자동추적탐지장치, 자동항법장치, 반응장갑, 탄약장전 형태, 레이저 거리측정기, 탄도계산기성능, 화생방장치, C4I 체계 연동, 능동방호장치

〈표 3〉의 비용인자는 CER에서 독립변수로 정의되며, 가변수는 보유 여부에 따라 0, 1로 표현되고, 특성변수는 실제 제원이 입력되는 변수이다.

4.3 양산비 비용자료 표준화

각 무기체계의 양산비 자료와 초도 양산품 단가를 산출하기 위한 학습률은 실제 양산을 담당하였던 해당 업체로부터 자료를 수집하였으며, 각 비용자료는 통계청의 생산자 물가지수를 적용하여 13년도 기준 불변가로 환산하였다.

본 연구에서 분석한 무기체계는 개발 및 양산연도가 오래되어 WBS별로 세분화된 비용자료가 부재하였으며, 상대적으로 최근에 양산되어진 K-2 전차와 K-21 장갑차에 대해 세부 비용자료를 획득하여 기타 무기체계에 대해서는 수집된 실적자료를 바탕으로 WBS별 비용분포에 따른 비율을 적용하여 세분화하였다. 표준화된 기동무기체계 양산비 비용자료는 〈표 4〉와 같다.

〈표 4〉 기동무기체계 양산비 비용자료

(단위 : 억 원)

구분	무기체계	
전 차	K-1	37.84
	K1구난전차	45.27
	K1A1	58.47
	K-2	87.56
장갑차	K200	7.27
	K200A1	8.68
	K242A1	8.61
	K281A1	8.28
	K21	39.4

4.4 방호구조 양산비 CER 개발

방호구조 CER 개발을 위해 WBS를 기준으로 각 무기체계별 방호구조에 해당하는 비용을 학습률을 적용하여 〈표 5〉와 같이 초도 양산품의 양산단가를 도출하였다.

〈표 5〉 방호구조 초도 양산품 양산단가

(단위 : 억 원)

구분	양산단가	학습률	T_1 비용	
전 차	K-1	2.73	94.6%	4.75
	K1구난전차	4.22	95.6%	6.30
	K1A1	3.26	96.6%	4.32
	K-2	6.31	96.0%	8.28
장갑차	K200	1.05	96.7%	1.48
	K200A1	1.25	96.2%	1.89
	K242A1	1.24	96.4%	1.68
	K281A1	1.19	95.3%	1.78
	K21	5.68	97.2%	7.31

도출된 초도양산품 양산단가를 종속변수 Y 로 정의하고, 비용인자를 독립변수로 정의하여 CER을 개발한다. 비용인자는 방호구조의 비용과 관련된 변수를 선택하기 위해 먼저 방호구조와 관련 없는 인자들은 제거한다. 예를 들면, 방호구조의 비용은 현수장치에 해당되는 보기륜의 수와는 연관성이 없기 때문에 사전에 이러한 무기체계의 형상에 대해 충분히 이해하고 인자를 구분해야한다. 이후 Foward, Stepwise Selection을 활용하여 관련 비용인자를 도출하였으며 특성변수 4개(길이, 전투중량, 항속거리, 최대토크)와 가변수 1개(반응장갑)가 선택되었다. 선택된 총 5개의 비용인자를 바탕으로 최적의 변수 조합을 찾기 위해 R^2 Selection을 적용하여 R^2 가 높고 AIC(Akaike Information Criterion)와 BIC(Bayesian Information Criterion)가 낮은 상위 4개 모형을 〈표 6〉과 같이 1차적으로 선별하였다. AIC는 두 확률분포들 사이의 거리를 측정하는 척도로서 최우추정량의 성질을 바탕으로 한 통계량이며, BIC는 최소 AIC 추정량이 차수를 높게 채택하는 경향을 보완하기 위한 통계량이다.

<표 6> 방호구조 비용인자 R² Selection 결과

구분	R ²	R _{adj} ²	선택 변수
1	0.9993	0.9986	길이, 전투중량, 항속거리, 최대토크
2	0.9915	0.9830	길이, 전투중량, 항속거리, 반응장갑
3	0.9837	0.9739	전투중량, 항속거리, 반응장갑
4	0.9837	0.9674	전투중량, 항속거리, 최대토크, 반응장갑

선택된 변수조합에 대해 다중공선성과 이상치 존재여부를 확인한 결과 4개 모형 모두 다중공선성은 존재하였고, 이상치는 존재하지 않아 주성분 회귀 분석을 통해 <표 7>과 같이 CER을 도출하였다.

회귀분석을 통해 CER이 도출되면 검증을 통해 CER의 사용 가능성 여부를 판단해야 한다. 검증은 실제값과 추정값을 비교하는 MMRE와 PRED 등을 사용하여 검증하였으며, 세부 검증결과는 <표 8>과 같다.

따라서 검증결과에 의해 상대적으로 R²와 R_{adj}², PRED(0.25)값이 높고 MMRE가 낮은 ‘모형 4’를 방호구조의 최종 CER로 선정하였다.

<표 7> 방호구조 양산비 CER 도출결과

구분	방호구조 CER	R ²
1	Y = 23.242 - 1.7383(길이) + 0.2042(전투중량) - 0.032(항속거리) + 0.0083(최대토크)	0.9878
2	Y = 23.011 - 1.829(길이) + 0.2422(전투중량) - 0.03(항속거리) + 3.823(반응장갑 유무)	0.9793
3	Y = 16.145 + 0.0477(전투중량) - 0.031(항속거리) + 3.625(반응장갑 유무)	0.9664
4	Y = 7.4939 + 0.10722(전투중량) - 0.0132(항속거리) - 0.0058(최대토크) + 3.9546(반응장갑 유무)	0.9825

<표 8> 방호구조 CER 검증 결과

구분	모형 1	모형 2	모형 3	모형 4
PRED(0.25)	0.778	1.00	0.778	1.00
MMRE	0.22	0.05	0.10	0.07
R ²	0.9878	0.9793	0.9664	0.9825
R _{adj} ²	0.9805	0.9668	0.9551	0.9721
p-value	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

4.5 동력장치 양산비 CER 개발

동력장치에 대한 비용을 학습률을 적용하여 초도 양산품 양산단가로 표준화한 결과는 <표 9>와 같다.

<표 9> 동력장치 초도 양산품 양산단가

(단위 : 억 원)

구분	양산단가	학습률	T ₁ 비용	
전 차	K-1	6.44	94.6%	11.22
	K1구난전차	9.95	95.6%	14.86
	K1A1	7.70	96.6%	10.19
	K-2	14.89	96.0%	19.53
장갑차	K200	0.69	96.7%	0.98
	K200A1	0.83	96.2%	1.25
	K242A1	0.82	96.4%	1.11
	K281A1	0.79	95.3%	1.18
	K21	3.75	97.2%	4.82

동력장치와 상관관계가 높은 비용인자를 정의하기 위해 Forward, Stepwise Selection을 적용하여 변수선택한 결과 특성변수 5개(전투중량, 엔진출력, 연료탱크용량, 엔진형태, 최대토크)와 가변수 1개(현수장치 형태)가 선택되었다. 6개의 비용인자에 대해 R² Selection을 적용하여 조건을 만족하는 상위 4개의 변수조합을 선별하여 다중공선성과 이상치 존재여부를 확인한 결과 모두 다중공선성이 존재하고 이상치는 없는 것으로 나타나 주성분분석을 통해 1차적인 동력장치의 CER을 <표 10>과 같이 도출하였다.

<표 10> 동력장치 양산비 CER 도출결과

구분	동력장치 CER	R ² (p-value)
1	Y = - 21.214 + 0.8012(전투중량) + 3.093(엔진형태) + 0.0069(연료탱크용량) - 0.113(최대토크)	0.9989 (0.0006)
2	Y = - 15.052 + 0.3174(전투중량) - 0.012(엔진출력) + 1.2365(엔진형태) + 0.0404(최대토크)	0.9979 (0.0001)
3	Y = - 11.423 + 0.1546(전투중량) + 0.848(엔진형태) + 0.0236(최대토크)	0.9962 (0.0001)
4	Y = - 10.613 + 0.1538(전투중량) + 0.00644(엔진출력) + 0.893(엔진형태)	0.9839 (0.0001)

위 4개의 CER에 대해 검증을 실시한 결과 ‘모형 1’을 제외한 나머지 3개 모형은 $MMRE \leq 0.25$ 와 $PRED(0.25) \geq 0.75$ 를 충족하지 못해 $MMRE$ 가 0.110이고, $PRED(0.25)$ 가 0.889로 기준을 충족하는 ‘모형 1’의 CER을 동력장치의 최종 CER로 선정하였다.

4.6 현수장치 양산비 CER 개발

현수장치의 양산단가를 학습률을 적용하여 초도양산품 양산단가로 표준화한 결과는 <표 11>과 같다.

<표 11> 현수장치 초도 양산품 양산단가

(단위 : 억 원)

구분	양산단가	학습률	T_1 비용	
전 차	K-1	2.09	94.6%	3.65
	K1구난전차	3.23	95.6%	4.83
	K1A1	2.50	96.6%	3.31
	K-2	4.84	96.0%	6.35
장갑차	K200	0.32	96.7%	0.44
	K200A1	0.38	96.2%	0.57
	K242A1	0.37	96.4%	0.51
	K281A1	0.36	95.3%	0.54
	K21	1.71	97.2%	2.20

Forward, Stepwise Selection을 적용하여 변수 선택한 결과 특성변수 5개(길이, 전투중량, 항속거리, 호통과능력, 보기륜 수)와 가변수 1개(현수장치 형태)가 선택되었다. R^2 Selection을 통해 기준을 충족하는 상위 4개 변수조합을 선택하여 다중공선성과 이상치 존재 여부를 확인하였으며, 4개 모형 모두 최대 VIF가 10 이상으로 다중공선성은 존재하였고 이상치는 존재하지 않아 주성분분석을 통해 4개 CER을 도출하였다. 1차적으로 도출한 현수장치 양산비 CER은 <표 12>와 같다.

<표 12>의 4개 CER의 검증결과 ‘모형 3’외에 나머지 3개의 CER은 모두 검증기준을 충족하였다. 따라서 상대적으로 $MMRE$ 가 낮고 $PRED(0.25)$ 가 높은 ‘모형 1’을 현수장치의 CER로 선정하였다.

<표 12> 현수장치 양산비 CER 도출결과

구분	현수장치 CER	R^2 (p-value)
1	$Y = 13.7567 + 0.15489(\text{전투중량}) - 0.02023(\text{항속거리}) - 3.2792(\text{호통과능력}) + 1.908(\text{현수장치 형태})$	0.9107 (0.0047)
2	$Y = 22.073 + 0.1288(\text{전투중량}) - 0.0216(\text{항속거리}) - 2.559(\text{보기륜수}) + 2.0873(\text{현수장치 형태})$	0.8872 (0.0083)
3	$Y = -80.1166 + 0.285(\text{전투중량}) - 31.371(\text{호통과능력}) + 25.89(\text{보기륜수}) - 0.4703(\text{현수장치 형태})$	0.9850 (0.0001)
4	$Y = 0.3094 + 0.1321(\text{전투중량}) + 1.129(\text{호통과능력}) - 0.641(\text{보기륜수})$	0.8918 (0.0013)

4.7 보조장치 양산비 CER 개발

보조장치의 양산단가를 학습률을 적용하여 초도양산품 양산단가로 표준화한 결과는 아래와 같다.

<표 13> 보조장치 초도 양산품 양산단가

(단위 : 억 원)

구분	양산단가	학습률	T_1 비용	
전 차	K-1	2.44	94.6%	4.25
	K1구난전차	3.77	95.6%	5.62
	K1A1	2.92	96.6%	3.86
	K-2	5.64	96.0%	7.40
장갑차	K200	0.26	96.7%	0.37
	K200A1	0.32	96.2%	0.48
	K242A1	0.31	96.4%	0.43
	K281A1	0.30	95.3%	0.45
	K21	1.43	97.2%	1.84

비용인자에 대해 Forward, Stepwise Selection을 적용한 결과 특성변수 3개(길이, 전투중량, 장애물통과능력)와 가변수 2개(화생방장치, C4I 체계 연동)가 선택되었으며, R^2 Selection을 적용하여 최적의 변수 조합 4개를 선택하였다. 4개 변수조합에 대한 검증결과 모두 최대 VIF값이 10 이상으로 다중공선성이 존재하였고, 이상치는 존재하지 않았다. 따라서 주성분분석을 통해 <표 14>와 같이 CER을 도출하였다.

<표 14> 보조장치 양산비 CER 도출결과

구분	보조장치 CER	R ² (p-value)
1	Y = 6.1263 - 1.2204(길이) + 0.2818(전투중량) - 4.5126(장애물통과능력) + 1.3618(C4I 연동)	0.9835 (0.0013)
2	Y = 28.7504 - 1.496(길이) + 0.6006(전투중량) - 43.79(장애물통과능력) + 2.7835(화생방장치)	0.9497 (0.0011)
3	Y = - 1.355 + 0.1147(길이) + 0.0718(전투중량) + 1.4491(화생방장치) + 0.5254(C4I연동)	0.9898 (0.0013)
4	Y = - 3.9318 + 0.569(길이) + 1.633(장애물통과) + 1.827(화생방장치) + 0.3602(C4I연동)	0.9843 (0.0013)

위의 4개 CER의 검증결과 ‘모형 2’를 제외한 나머지 3개 모형은 모두 검증기준을 충족하지 못했으며, ‘모형 2’는 MMRE가 0.133이고, PRED(0.25)가 0.778로 기준을 충족하여 ‘모형 2’를 보조장치의 CER로 선정하였다.

4.8 사격통제장치 양산비 CER 개발

사격통제장치는 전차 3종(K-1, K1A1, K-2)과 장갑차 1종(K-21)에만 장착되어 운용되고 있다. 따라서 총 4개 무기체계에 대해 CER을 개발하였다. 사격통제장치에 대한 초도 양산품 양산단가는 <표 15>와 같다.

<표 15> 사격통제장치 초도 양산품 양산단가

(단위 : 억 원)			
구분	양산단가	학습률	T ₁ 비용
K-1	2.44	94.6%	4.25
K1구난전차	2.92	96.6%	3.86
K1A1	5.64	96.0%	7.40
K-2	1.43	97.2%	1.84

Forward, Stepwise Selection 결과 특성변수 3개(조준경탐지범위, 사격통제컴퓨터 중량)와 가변수 1개(탄도계산기성능)가 선택되었고, 최적 변수 조합은 총 3개로 도출되었다. 다중공선성과 이상치

여부에 따라 주성분분석과 다중회귀분석 적용 결과는 <표 16>과 같다.

<표 16> 사격통제장치 양산비 CER 도출결과

구분	사격통제장치 CER	R ² (p-value)
1	Y = - 63.8757 + 0.00195(조준경 탐지범위) + 2.8079(사격통제컴퓨터 중량)	0.9832 (0.0084)
2	Y = - 12.925 + 0.0028(조준경 탐지범위) + 5.92(탄도계산기 성능)	0.9978 (0.0472)
3	Y = - 166.783 + 8.57(사격통제컴퓨터 중량) - 12.077(탄도계산기 성능)	0.6264 (0.2086)

위 3개의 CER 중 ‘모형 3’은 R²가 낮아 제외하고 나머지 두 개의 CER은 모두 MMRE와 PRED(0.25)의 기준을 충족하였다. 따라서 상대적으로 MMRE가 0.013으로 낮고, PRED(0.25)가 1.00으로 더 높게 기준을 만족하는 ‘모형 1’을 사격통제장치 양산비 CER로 선택하였다.

4.9 포탑 양산비 CER 개발

포탑 또한 사격통제장치와 마찬가지로 전차 3종(K-1, K1A1, K-2)과 장갑차 1종(K-21)에만 장착되어 운용되고 있다. 포탑에 대한 초도양산품 양산단가는 <표 17>과 같다.

<표 17> 포탑 초도 양산품 양산단가

(단위 : 억 원)			
구분	양산단가	학습률	T ₁ 비용
K-1	8.82	94.6%	15.37
K1구난전차	13.63	96.6%	20.36
K1A1	15.69	96.0%	20.58
K-2	7.47	97.2%	9.61

포탑 특성에 해당하는 비용인자는 특성변수 4개(길이, 전투중량, 주포구경, 유효사거리)와 가변수 1개(탄약장전형태)가 도출되었고, R² Selection을 거쳐 선택된 변수조합에 따른 회귀식의 구성은 <표 18>과 같다.

〈표 18〉 포탑 양산비 CER 도출결과

구분	사격통제장치 CER	R^2 (p-value)
1	$Y = 56.0432 - 12.892(\text{길이}) + 1.6525(\text{전투중량})$	0.8579 (0.0738)
2	$Y = 34.571 - 5.6151(\text{길이}) + 0.3412(\text{주포구경})$	0.8755 (0.0643)
3	$Y = 16.748 - 1.1627(\text{전투중량}) + 0.5628(\text{주포구경})$	0.9003 (0.0511)

위 CER에 대해 실제값과 추정값을 비교한 결과 ‘모형 3’이 R^2 가 가장 높고, MMRE와 PRED(0.25) 또한 기준을 충족하여 포탑 양산비의 CER로 선택하였다.

4.10 비용요소 추정식(FER)

비용요소 추정식(FER)은 기술 및 인력운영 등과 같은 개발과 양산과정에 부수적으로 투입되는 비용에 대한 값을 도출하기 위한 식이다. 이는 매년마다 혹은 각 업체별로 적용되는 비율과 금액이 상이하므로 이를 하나의 일관성 있는 수식으로 도출하기가 어렵다. 따라서 FER은 개발된 CER의 추정값 대비 비율로서 표현하여 대략적인 비용을 판단할 수 있는 수식으로 표현한다. 이를 위해 먼저 실제 투입된 실적자료가 필요하며, 본 연구에서는 수집 가능한 K-2 전차와 K-21 장갑차의 투입비용을 근거로 〈표 19〉와 같이 비율을 도출하였다.

〈표 19〉 기동무기체계 양산비 상대적 비율 도출 결과

구분	실적자료 평균 비율	CER 항목 상대적 비율
1.2 사업관리/체계공학	0.06	0.09
1.3 종합군수지원	0.21	0.30
1.4 훈련장비	0.03	0.04

총 비용이 100억인 무기체계에서 CER로 개발되는 항목의 금액이 60억이고, 체계공학 금액이 10억 일 경우 실적자료 평균비율은 0.10(10%)이고, CER 항목 상대적 비율은 $10/60 = 0.167$ (약 17%)이다.

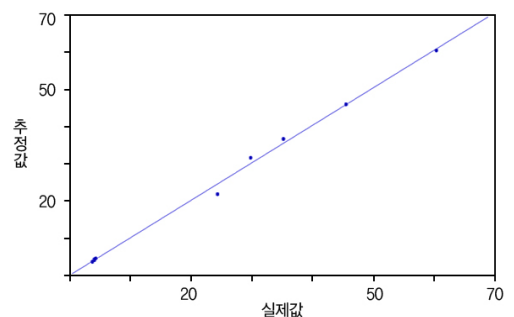
따라서 FER 비율은 위 표와 같이 사업관리/체계공학은 9%, 종합군수지원 비용은 30%, 훈련장비는 4%로 적용하였다.

4.11 비용추정관계식 통합 및 검증

본 단계에서는 지금까지 개발된 6개의 CER을 통합하여 총 금액 측면에서 실제값과 추정값을 비교하여 검증한다. 단, FER 항목은 실적자료의 평균값에 의존되고 수식으로 개발된 항목이 아니므로 제외하고, CER 항목에 대해서만 검증하였다. 통합된 CER에 대한 실제값과 추정값을 비교한 결과는 〈표 20〉과 같다.

〈표 20〉 양산비 통합 CER 검증결과

구분	실제값	추정값	MRE	MMRE
K-1	46.16	46.33	0.00	0.058
K1A1	31.61	29.9	0.05	
K1구난	21.68	24.59	0.13	
K-2	60.85	60.19	0.01	
K200	3.27	3.58	0.09	
K200A1	4.19	4.4	0.05	
K242A1	3.73	4.07	0.09	
K281A1	3.95	4.07	0.03	
K21	36.75	34.29	0.07	



위와 같이 개발된 CER의 전체 MMRE는 0.058로 나타났고, 실제값과 추정값은 약 6% 정도의 편차를 보이고 있다. 따라서 무기체계 획득 초기단계에서 향후 투입될 비용을 예측함에 있어서는 상당히 정확한 CER이 개발되었음을 볼 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 현재 국내에서 연구개발 되고 양산실적이 있는 기동무기체계 9종을 대상으로 한국 방산환경에 적합한 CER을 개발하였다. 즉, 외국의 자료가 반영되지 않은 순수 국내 자료에 입각하여 외국의 상용모델을 사용함으로써 발생하는 비용의 편차를 줄일 수 있는 발판이 되었다는 점에서 본 연구에 의의가 있다. 단, 9종에 대한 무기체계를 대상으로 분석하여 제한된 자료의 수로 인한 회귀식의 신뢰성 측면에서는 다소 부족할 수 있다. 9개의 자료의 수로 R^2 Selection 등 변수선택 방법을 적용하여 상대적으로 높은 R^2 값을 갖는 변수조합으로 모형을 구성했다는 점과 9종의 무기체계의 구조와 특성이 유사하여 R^2 가 상당히 높게 나타난 점으로 미루어 더욱 신뢰성 높은 비용추정관계식 개발을 위해서는 다음과 같은 연구가 지속적으로 필요하다.

첫째, 더 많은 자료를 확보하여 모형을 구성할 필요가 있고, 부족한 자료의 수를 극복할 수 있는 방안을 연구해야 한다. 본 연구에서 사용한 9종의 무기체계 외에 추가적인 자료를 획득하여 분석했을 시 자료의 수와 R^2 의 변화에 어떠한 연관성이 있는지 확인해볼 필요성이 있다. 또한 자료의 수가 방대할 경우 다중공선성이나 이상치를 발생시키는 자료는 삭제하고 분석이 가능하지만 지금과 같이 자료의 수가 한정되어 있을 경우 특정 자료를 제외하고 분석하기 어렵다. 따라서 자료의 수가 제한될 경우 Random Sampling 기법 등을 적용하여 모형의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방안을 연구해볼 필요가 있다.

둘째, 본 연구에서 사용된 비용인자에는 무기체계의 재질과 관련된 특성을 반영하는 인자는 자료 수집의 제한으로 반영되지 못했다. 미래 무기체계는 중량이 감소되고 방호력은 증가되는 첨단 재질을 사용한 무기체계가 개발될 것이므로 무기체계의

재질특성이 변수로 추가되어 미래 비용 예측에 활용될 수 있는 실질적인 CER 개발 연구가 계속되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 국방부, 「국방전력발전업무훈령」, 2012.
- [2] 강성진, 「비용추정론」, 두남출판사, 2010.
- [3] 최병선, 「SAS를 이용한 시계열분석 시리즈 3, 회귀분석(上), (下)」, 세경사, 1997.
- [4] 강성진, 김숙한, 이순기, 이호석, 최규명, 최돈오, 「Parametric Estimating Handbook」, 중앙문화사, 2005.
- [5] 정태균, 이용복, 강성진, “실적자료를 활용한 PRICE 모델의 보정방안 연구”, 「국방경영분석학회지」, 제36권, 제1호(2010), pp.29-38.
- [6] 이용복, 김동규, 정원일, 강성진, “유도무기체계 연구개발 비용추정 모델 개발에 관한 연구”, 「한국방위산업학회지」, 제19권, 제1호(2012), pp. 74-99.
- [7] 어원재, 이용복, 강성진, “한국 무기체계 개발 실적으로 고려한 연구개발 비용추정관계식 개발”, 한국경영학회 2009년 추계학술대회논문집 (2009), pp.615-620.
- [8] 한현진, 강성진, “PRICE 모델을 이용한 적정 획득비용 추정방안”, 「한국국방경영분석학회지」, 제27권, 제1호(2010), pp.10-27.
- [9] US DoD, 「Department of Defense Handbook-Work Breakdown Structure」, MIL-HDBK-881, 1998.
- [10] Bruce, W.N. Lo and Xiangzhu Gao, “Assessing Software Cost Estimation Models : Criteria for Accuracy, Consistency and Regression,” *Australasian Journal of Information System*, Vol.5, No.1(1997), pp.30-44.