유도무기 획득단가 추정 모델 개발에 관한 연구

A Study on Developing the Acquisition Unit Cost Estimating Model of the Guided Weapon System

김 용 현* 이 용 복* 정 원 일* 김 동 규* 강 성 진*
Yonghyun Kim Yongbok Lee Wonil Jung Dongkyu Kim Sungjin Kang

Abstract

Cost estimates are necessary for government acquisition program to support decisions about funding, to develop annual budget requests and to validate resource requirements at key decision points. Many researches have been done about cost estimating technique recently. Parametric cost estimating models based on CERs(Cost Estimating Relationships) have been mainly used using regression method with historical data. However, there are many restrictions in developing Korean version CERs because the number of data points are too small. Specially, data collection and data management system are unstable in Korean defense environment, when developing CERs. In this research, we analyzed the historical data, and found some cost drivers in guided weapon system area. We developed the Acquisition Unit Cost CER using the regression to remove multicollinearity in the historical data. So we could overcome the restriction of the insufficient sample number. This research as a first attempt is meaningful in terms of obtaining our own Acquisition Unit Cost CER using historical cost and physical characteristic in Korean development environment.

Keywords : Regression Analysis, CER(Cost Estimation Relationship), Multicollinearity, Outlier, MRE, MMRE, PRED(ℓ)

1. 서론

국방 무기체계의 대형화, 첨단화 등으로 인해 무기 체계 획득비용은 날로 증가하고 있는 반면 투명성, 효율성에 대한 국민의 관심이 증대됨에 따라 비용분석의 중요성과 정확성은 날로 강조되고 있다. 그로인해

국방사업에 대한 투명성을 제고하고 투입할 비용에 대한 분석을 통해 합당한 가치를 가진 무기체계를 도입하기 위해 국방부 및 각 군에서는 비용분석을 전담으로 하는 기구를 설립하였다. 이러한 기구를 통해 사업에 대한 비용분석을 사업관리 부서에서 주체가 되어 실시하도록 하고 있으며, 전산모델에 의한 방법을 포함하여 2가지 이상의 방법으로 비용 추정을 실시, 이를 비교·분석하도록 하고 있다.

특히 우리나라는 연간 10억불 이상의 무기체계 장비를 외국으로부터 구매하고 있으나 체계적인 비용정

† 2012년 6월 10일 접수~2012년 9월 14일 게재승인

* 국방대학교(Korea National Defense University)

책임저자 : 이용복(miliman@naver.com)

보 및 분석업무 프로세스의 부재로 인하여 계약시점에 압박한 단편적인 비용정보만을 획득하여 제공하는 한계점을 가지고 있었다. 무기체계별 구매비용 절감에 대한 요구는 나날이 높아지고 있기 때문에 비용분석의 필요성은 더욱 증가되고 있는 실정이다.

반면 국방분야의 비용분석은 '90년대 말부터 시작되어 비용분석의 필요성에 대한 공감대 형성 및 제도적인 기틀은 어느 정도 마련되었으나 기반여건은 아직 미흡한 실정이다. 특히 비용추정을 위한 각종 방법론에 대한 연구가 미흡하다. 이는 한국형 비용추정 Tool의 부재로 인해 외국의 비용분석 모델을 주로 사용함에 따라 비용추정 논리에 대한 검정이 불가하여 추정비용의 정확성과 신뢰성에 대해 많은 의문을 제기하고 있다.

또한 지금까지 국외의 유사무기체계를 활용한 비용분석 모델 개발에 관한 연구자료들을 살펴 보면, 대부분 최종 모델 개발 이후 활용하는 비용 데이터 표준화 단계에서 현지 통화를 단순히 국내 통화로 환가화하는데 그쳐 실제로 수입하면서 국내 통화 및 협상등을 통해 추가되는 여러 비용적인 측면을 간과하였다. 이를 그대로 국내 방산환경에 적용하기에는 다소 부적합하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 한계 사항을 보완하고 국내 방산환경하에서 구매대상 무기체계의 적정 가격의 예측이 가능한 모델의 개발을 유도무기(Missile)에 한정하여 유사무기체계 추정법(Analogy Analysis Method) 및 매개변수 비용 추정법(Parametric Cost Estimating) 등 비용추정방법론과 선행 연구된 CER 개발 모형을 이용하여 비용추정모델의 연구를 진행하였다.

2. 적용된 방법론

가. 매개변수 비용 추정법

매개변수 비용 추정법은 통계적 기법을 이용하여 무기체계 비용을 종속변수로 두고 비용인자를 독립변수로 두어 CER을 도출하는 것으로써, 입력변수의 조정으로 비용추정을 비교적 쉽게 할 수 있는 반면, 모델을 구축하는데 사용된 자료의 타당성과 일관성 보장이 어렵다.

매개변수에 의한 비용추정 과정은 자료수집, 비용주도요인 식별, CER 구축, Parametric 모형구축 단계로 진행된다^{1,2)}.

나. 데이터 특성을 고려한 회귀분석 방법

CER 개발의 신뢰성 향상을 위해 데이터 특성 즉, 다중공선성, 이분산성, 이상치의 문제점을 해결하기 위한 회귀분석 4가지 방법이 있다.

이러한 방법 중 능형 회귀는 일정부분 편향을 인정하면서 분산을 최소화하여 다중공선성 문제를 해결하며, 주성분 회귀는 상호 독립적인 주성분을 유도함으로써 다중공선성 문제를 극복한다. 또한 로버스트 회귀는 이상적 오차에 큰 가중치를 부여함으로써 이상치의 문제를 완화하며, 가중 회귀는 오차가 등분산이 되도록 가중치를 부여함으로써 이분산성 문제를 해결한다.

3. 모델 개발 및 검증 절차

가. 모델 개발 과정

1) CER 개발도

본 연구에서는 일반적 모델 개발 절차로 통계적 검정과 기법을 이용하여 데이터의 특성에 따라 다양한 회귀분석기법을 적용하여 개발한다. 특히 기본적인 CER 개발논리에 초점을 맞추어 CER DB구축이나 행정적 승인과 같은 사전, 사후 절차는 생략한다. Fig. 1은 본 연구에서 CER 개발을 위해 따르는 기본적 절차이다.

2) 자료 수집 및 가공

1단계는 자료 수집 단계로서 4단계 과정을 거쳐서 자료를 수집한다. 첫째, 비용분석가는 비용추정 임무의 전반적인 구조를 이해한다. 둘째, 비용추정 구조와 추정범위를 설정한다. 셋째, 비용추정에 사용하게 될 매개변수 비용추정법과 그에 필요한 자료를 이해한다. 넷째, 자료 수집을 계획하고 이행한다. 현재 개발중인 통합원가시스템(2012년 개발 완료 예정) 및 운영중인 EVMS, 그리고 방위사업청, 방산업체, 국방과학연구소 등의 유관기관 등으로부터 비용, 기술, 사업계획에 관련된 모든 자료를 획득한다¹⁾.

2단계는 자료 평가 및 표준화 단계로서 일정한 기준에 의해 자료를 평가 및 표준화한다. 비용자료는 단위를 일원화 시키며 경제기준년도를 인플레이션을 적용하여 수집된 자료들의 각기 다른 경제기준년도를 하나의 경제기준년도로 통일시킨다. 그리고 중량, 밀도 등 규격 자료를 하나로 일원화시킨다.

Fig. 1. CER development process

3단계는 비용주도요인 식별 단계로서 분야별 전문가들과 인터뷰를 통해서 비용주도요인을 파악하거나, 수집된 자료의 산포도를 통해 매개변수와 비용의 관련성을 확인하여 식별한다.

4단계는 자료의 개수 확인 단계로서 수집된 자료의 개수에 따른 통계적 분석 가능성을 판단한다.

3) 자료 분석

첫 번째 단계는 다중공선성 판단 단계이다. 이 단계에서는 VIF(Variance Inflation) 및 CI(Condition Index)를 기준으로 자료의 다중공선성 여부를 판단한다. VIF 및 CI에 의한 다중공선성 판단 기준은 앞서 제시한 바와 같이 VIF 값이 10보다 크고 CI값이 30보다 클 때 다중공선성이 존재한다고 판단한다.

두 번째 단계는 다중공선성 판단 결과 조치 단계로서 다중공선성 미존재시와 존재시로 구분하여 조치한다. 다중공선성이 존재하지 않는다면 다음 단계인 이상치 판단 단계를 실시하고, 다중공선성이 존재한다면 주성분 회귀 및 능형 회귀를 적용하기 위해 비용인자를 제거하지 않은 상태에서 이상치 판단 단계로 넘어

가거나 비용인자 제거에 의한 다중공선성 해결을 위해 6가지 변수선택 방법론을 적용하여 다중공선성이 없는 비용인자 조합을 선택한다. 만약 복수 선택된 모든 조합에서 다중공선성이 재발견되었다면 R^2 가 높은 조합 순부터 차례로 다중공선성을 진단하여 다중공선성이 제거된 첫 번째 조합을 가지고 다음 단계를 수행한다. 세 번째 단계는 이상치 판단 단계로서 이상치 판단 기준은 표준화 잔차(Studentized Residual) 및 표준화 제외잔차(Studentized Deleted Residual) 등 이상치 진단 척도 등을 이용하여 비용에 대한 이상치를 판단하고 지렛대값(Leverage)를 이용하여 비용인자의 이상치를 판단한다^[10].

이상치로 판단된 값에 대해서는 쿡의 거리(Cook's Distance)를 적용하여 이상치의 전체 적합값에 대한 영향력을 판단하고 모수값 변화(DFBETAS : Difference in Betas)를 통해 회귀계수의 영향력을 판단한다^[4,5].

네 번째 단계는 이상치 판단 결과 조치 단계로서 이상치가 존재하고 그에 대한 영향력이 높을 때에는 다음 두 가지 방법으로 문제를 해결한다. 첫째, 로버스트 회귀를 통한 이상치 문제 해결 방법을 적용하기

위해 이상치를 제거하지 않고 이분산성을 판단한다. 둘째, 관측값 제거에 따른 이상치 문제 해결을 위해 이상치 제거 후 비용인자 선택을 다시 수행하고 이분산성을 판단한다. 통계적 검정에 따른 이상치 존재여부에 관계없이 각 요소들의 영향력이 없을 시에는 이분산성 판단 단계로 넘어간다.

다섯 번째 단계는 이분산성 판단 단계로서 잔차 산포도에 의해 판단한다. 이분산성 판단 기준은 산포도가 비용인자(X_i) 기준으로 잔차가 불규칙적으로 분포하면 이분산성이 존재하지 않은 것으로 판단하고, 비용인자에 따라 잔차가 비례하는 형태로 나타나면 이분산성이 존재하는 것으로 판단한다. 참고로 이런 형태 외에 다른 형태의 잔차 산포도를 보일 수 있는데 이때는 독립변수나 종속변수들을 적당한 형태로 변환하여 재분석한다.

여섯 번째 단계는 이분산성 판단 결과 조치 단계로서 이분산성 존재시에는 CER 개발 방법 중 잔차를 등분산으로 변환시키는 가중 회귀를 적용하여 이분산성 문제를 해결한다. 이분산성 미존재시에는 1~5단계 과정을 통해 선정된 방법에 따라 CER 개발 단계로 넘어가 능형 회귀, 주성분 회귀, 로버스트 회귀, 선형 회귀, 로그선형 회귀를 적용한다.

나. 모델 평가 및 검증

1) 통계적 평가

각 CER 모델이 통계적으로 유의한지 판단하기 위하여 R^2 검정, t 검정, F 검정을 실시한다. 결정계수(R^2)는 회귀분석 모형의 적절성을 평가하는 기준으로, 비용분석 전문가들의 의견 수렴결과로 R^2 값이 0.8 이상일 때 모형이 적절하다고 판단한다. t 검정은 추정된 각각의 회귀계수들의 타당성을 검증하는 기준으로 유의 수준 5% 내의 확률값을 기준점으로 지정하여 모델의 추정된 회귀계수 타당성을 판단한다. 검정통계량이 설정된 유의수준 꼬리 확률에 있으면 귀무가설을 기각하여 추정된 회귀계수가 타당하다고 판단한다.

F 검정은 추정된 전체 회귀계수의 타당성을 검정하는 통계적 기준으로 유의 수준 5% 내의 확률값을 기준점으로 설정하여 추정된 전체 회귀계수의 타당성을 검증한다. $F_\alpha(h, n-k-1) < F$ 이면 귀무가설을 기각하여 추정된 전체 회귀계수가 타당하다고 판단한다.

2) 모델 타당성 검증

모델 타당성 검증은 MMRE(Mean Magnitude of

Relative Error)와 $PRED(l)$ (Prediction at level l)에 의해 실시된다. MRE는 가장 기본적으로 사용되는 검증 척도로서 상대오차의 절대값인 MRE가 작을수록 모델의 정확도는 높아지며, MMRE는 비용추정치 정확도의 평균으로 선정된 기준에 따라 정확성 정도를 정량적으로 명시한다. MMRE에 의한 타당성 판단 기준은 식 (1)과 같으며 이 식을 만족할 때 모델의 타당성이 입증된다^[7].

$$MMRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (1)$$

또한 $PRED(l)$ 에서 l 은 오차 범위를 의미한다. $PRED(l)$ 에 의한 타당성 검증은 식 (2)에 의해 판단되며 $PRED(0.3) \geq 0.3$ 일 때 모델의 타당성이 검증된다^[9].

$$PRED(l) = \frac{k}{n} \quad (2)$$

※ n : 전체 데이터 수

k : $MRE \leq l$ 에 해당되는 데이터 수

4. 유도무기 획득단가 모델 개발

가. 모집단 및 변수 식별

1) 자료수집, 평가 및 정규화

본 연구에서는 현재 미국에서 개발되고 운영유지 되어온 현역 혹은 퇴역 미사일의 관련 자료중 국내 도입되어 운용중이거나 이와 유사한 미사일 체계들을 대상으로, 국내 방산환경에 적합한 자료로 한정하여 수집하였으며, 그 대상으로 Missile Data Book 2000에 나와 있는 104개의 미사일 표본집단 중 국내 도입 및 유사 체계로 26개에 대한 데이터를 획득하였다. 그리고 국내 도입하여 운용중인 유도무기체계에 대한 데이터는 합동무기체계목록서를 통해 획득단가를 수집하였다.

이 연구에 사용된 자료는 국내 유도무기체계 획득 비용 추정모델로서 미국의 미사일 개발관련 비용자료를 이용하고, 모형 추정을 위한 주요 비용인자로서, 무기체계 제원관련 변수, 즉 비용인자를 이용하였다. 비용인자라 함은 비용추정관계식이 목표로 하는 비용 추정 결과를 얻는 데에 공헌하는 각종 설명변수들을 의미하며, 무기체계 개발비용과의 관계가 높을 것으로

파악되는 특성변수 혹은 이들 상호간 함수관계를 갖는 관련 변수들을 의미한다. 미국 미사일 자료는 현·퇴역 무기체계 자료이며, 각 무기체계, 즉 관찰치별 획득단가, 개발단가, 그리고 각 기술 특성치들이 제시되어 있다.

다음으로 자료 평가 및 표준화 단계로서 표준화 영역 중 비용자료 및 척도에 있어서 원자료에 대한 표준화의 필요성이 인식되어 다음과 같이 자료를 변환하였다.

수집된 자료는 표준화 작업을 통해 동일한 기준으로 통일한다. 물리적 특성치는 미터법 단위를 기준으로 통일하여, 독립변수인 총중량, 탄두중량 등은 kg, 최대속도는 km/h, 최대사거리는 km, 최대고도, 전장, 직경 및 FIN 직경은 m로 표준화하였다. 종속변수인 획득 및 개발단가는 연도별 환율 및 물가상승률을 반영한 비용현가화를 통해 「2011년 불변가」로 표준화하였다.

비용추정관계식(CER)의 구축에는 여러 가지 고려할 사항들이 있다. CER의 구축은 통계적인 추론과정을 통해 이루어짐을 상기한다면, 각 통계분석에 이용될 적절한 자료획득과 관리 등이 요구된다. 또한 주어진 정보를 최대한 이용하기 위해 여러 부수적인 과정도 수반된다. 여기에는 새로운 변수들의 생성이나 불필요한 혹은 오류가 있는 관찰치의 삭제 혹은 수정작업이 포함되기도 한다. 이러한 자료정리 작업을 통해 CER 구축을 위한 구체적인 비용인자들과, 그 특성을 각 범주에 따라 구분하였다.

다음으로 국내 도입 및 개발되고 운영유지 되어온 유도무기와 미국 미사일 단위 획득비와의 상관관계를 알아보기 위해 70년대 이후 도입 및 개발된 유도무기 획득비를 연도별 환율 및 물가상승률을 반영한 비용현가화를 통해 「2011년 불변가」로 표준화하였다.

일반적인 선형회귀에서는 절편이 있는 모형을 사용한다. 하지만 때로는 설명변수 x의 값이 0일 때 반응변수 y의 값이 반드시 0이 되어야 하는 경우가 있다. 예를 들면, 어떤 화학공정의 온도가 0도일 때 그 공정 프로세서의 수율이 0인 경우이다. Fig. 2에서와 같이 비용대 비용으로 선형회귀를 할 경우에도 절편을 0으로 둔 모형을 사용하여야 한다^[3]. 선형회귀분석을 통한 결과를 살펴보면, Fig. 2에서 보는 바와 같이 회귀모형의 유의성은 p-값이 <0.0001 이하로 유의수준 5%에서 매우 유의하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 모형의 설명력을 나타내는 결정계수 R^2 값도 97% 정도로 매우 높게 나왔으며, t-검정 결과도 모두 유의하다는

The REG Procedure					
Model: MODEL1					
Dependent Variable: UC_KPROC					
Number of Observations Read		20			
Number of Observations Used		20			
NOTE: No intercept in model. R-Square is redefined.					
Analysis of Variance					
Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	1	1804.01538	1804.01538	628.60	<.0001
Error	19	54.52842	2.86992		
Uncorrected Total	20	1858.54380			
Root MSE		1.69408	R-Square	0.9707	
Dependent Mean		7.10000	Adj R-Sq	0.9691	
Coeff Var		23.86032			
Parameter Estimates					
Variable	DF	Parameter Estimate	Standard Error	t Value	Pr > t
UC_PROG	1	1.23327	0.04919	25.07	<.0001

Fig. 2. The result of linear regression for the unit acquisition cost

것을 알 수 있다. 기본적으로 양자 사이에는 매우 높은 상관관계가 성립함을 알 수 있다. 그리고 이를 통해 국내 유도무기 획득단가(UC_KPROC)와 미국내 유도무기 단위 획득비(UC_PROG)간 함수관계를 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$UC_KPROC = \hat{f}_1(UC_PROC) \\ = 1.23327 * UC_PROC$$

2) 비용 및 특성 관련 변수목록

가) 유도무기 추정 관련 변수 설정

표본 집단으로 선정된 자료를 바탕으로 다음과 같이 독립변수로 및 종속변수로 설정하였다.

- 독립변수 : 길이, 직경, 날개길이, 중량, 탄두중량, 속도, 사정거리, 도달고도
- 종속변수 : 유도무기 단위 획득비(원)

이상의 변수들은 모두 유도무기의 특성과 CER 도출을 위한 일차적인 특성치이며, 비용관련 자료를 형성하는데 사용된다.

나) 특성 지시용 더미변수 설정

위에서 고려한 무기체계의 특성을 나타내는 제원 및 성능 관련 변수 뿐 아니라 무기체계를 종류별로 구분하는 데에 사용되는 변수들의 설정이 필요하다. 이 변수들을 모델에 포함될시 각 변수들이 지시하고

자 하는 범주들을 구분하는 지시변수 역할을 하며, 통계적으로 더미변수라 불린다. 여기서는 항공기 발사용(Air-Launched), 지상 발사용(Ground-Launched) 등 2가지 종류로 구분하였으며, 더미변수는 다음과 같이 지정하였다.

$D_Air = 1, (if \text{ platform} = \text{Air-Launched}) = 0, (if \text{ not})$

다) 해당사항이 없는 관찰치의 보완 및 자료정리

유도무기의 특성상 몇 가지 제원관련 변수들은 해당사항이 없어 변수값을 갖지 않는 경우와 해당 제원들이 공개되지 않아 획득이 불가능한 경우가 있다. 예를 들어 대륙간 탄도미사일과 같은 관찰치의 대부분은 꼬리날개(Fin)가 없으며, 보병 휴대용 대전차 로켓미사일(Portable Anti-armor Missile)의 경우는 지표면 높이로 비행하여 목표에 명중하는 관계로 도달고도가 거의 0에 해당된다. 또한 관련 데이터의 획득이 불가능하여 제원 관련 값이 0으로 설정되는 경우도 발생한다. 이와 같은 변수들은 주로 꼬리날개 길이(Fin Span), 속도(Speed), 사정거리(Range), 도달고도(Altitude)가 해당된다.

이러한 제원 변수들이 값을 갖지 않는 경우, 회귀분석을 통하여 통계 분석시 계산과정에서 그 관찰치들이 모두 제외된다는 문제점이 발생한다. 이러한 값들을 통계학에서는 결측치(Missing Value)라 하며, 결측치는 통계계산과정에서 모두 제외되어 버린 상태에서 추정방정식을 작성하기 때문에 이러한 방정식은 신뢰성이 저하되거나 충분한 관찰치 개수를 채우지 못해 분석자체가 불가능한 경우도 발생한다.

이러한 문제점을 보완하기 위하여 다음과 같이 해당 변수가 0의 값을 가질 경우에는 각 변수에 해당되는 평균치를 대입하거나 변수 입력값의 폭이 클 경우에는 오류 발생 및 정보손실을 방지하기 위해 제외시켰다.

3) 비용인자(Cost Driver)선택

가) 유도무기 일반

먼저 독립변수인 발사중량, 탄두중량, 최대속도, 사정거리, 최대 도달거리, 길이, 직경, 꼬리날개 길이, 그리고 지시변수인 발사 플랫폼을 이용해 종속변수인 단위 획득비와의 관계를 가장 잘 설명할 수 있는 변수를 선택하고자 한다. 본 연구에서는 여러 가지 변수 선택방법 중 R^2 , R_{adj}^2 , C_p 값을 기준으로 최상의 모형을 구현할 수 있는 변수를 선택한다. 또한, 본 연구의

목적상 유도무기의 특성을 가장 잘 반영한 CER을 개발하기 위해 발사중량을 비용인자에 반드시 포함시키기로 한다. 발사중량은 기본적으로 탄두중량과 상관관계가 매우 높은 비용인자로 유도무기의 기본적인면서 핵심적인 기능, 즉 폭발성능에 지대한 영향을 미치는 요소이다. 이에 따라 과학적 기법적용 결과와 비용분야 전문가와의 인터뷰 등을 바탕으로 선정된 모형에 포함되는 비용인자는 발사중량, 최대속도, 최대고도, 직경 및 플랫폼이다.

나) 공중발사 유도무기

공중발사 유도무기는 독립변수로 유도무기 일반에서 플랫폼을 제외한 발사중량, 탄두중량, 최대속도, 사정거리, 최대 도달거리, 길이, 직경 그리고 꼬리날개 길이 등 8가지를 이용하며 그 외에 조건은 동일하다. 공중발사 유도무기의 특성을 가장 잘 반영한 CER을 개발하기 위해 앞서 제시한 발사중량 외에 전장을 비용인자에 반드시 포함시키기로 한다. 전장은 공간적 제한사항을 띠는 전투기에 탑재하는 무기체계인 만큼 특별히 고려되어야 할 요소로 판단하였다. 이에 따라 과학적 기법적용 결과와 비용분야 전문가와의 인터뷰 등을 바탕으로 선정된 비용인자는 발사중량, 전장, FIN 직경이다.

4) 비용인자 특성 분석

가) 유도무기 일반

먼저 다중공선성 판단 단계로서 VIF 및 CI를 기준으로 하여 다중공선성을 판단하였으며, 비용인자별 VIF 및 CI 산출 결과는 Table 1과 같다. 데이터의 다중공선성 여부를 판단하기 위해 Table 1을 분석해 보면 VIF 부분에 있어서는 모든 비용인자들이 10미만이고 CI가 30을 초과하지 않았으므로 데이터에 다중공선성이 존재하지 않는다고 판단하였다.

다음으로 다중공선성이 존재하지 않기 때문에 이상치 판단 단계로 넘어가 표준화 잔차, 표준화 제외잔차, 지렛대값 등을 이용하여 이상치 여부를 판단하였

Table 1. VIF and CI for each cost drivers

구 분	총중량	최대속도	최대고도	직경	플랫폼
VIF	7.276	1.767	2.597	5.476	1.950
Condition Index	2.701	4.793	6.022	9.824	14.078

으며, 그 결과 이상치 판단 검정값 별로 유의수준을 초과하는 이상치가 없으며 영향력 조사에서는 Cook Distance 및 DFBETAS 값이 기준치 보다 낮아 영향력도 크지 않다고 할 수 있다.

이상치 판단 결과 없는 것으로 나와 데이터 분석 마지막 단계로 이분산성 판단 단계로 넘어간다. 26개의 유도무기체계에 대한 잔차 산포도 확인결과 일정한 패턴없이 분포하는 것을 보아 이분산성이 존재하지 않는다. 다음으로 공중발사 유도무기에 대한 데이터 분석을 시행한다.

나) 공중발사 유도무기

앞서 제시한 방법과 동일하게 다중공선성 판단을 위해 VIF 및 CI를 판단하였으며, 비용인자별 VIF 및 CI 산출 결과는 Table 2와 같다. Table 2를 분석해 보면 모든 비용인자들의 VIF값 10미만이고 CI가 30을 초과하지 않았으므로 앞선 유도무기 일반에서와 동일하게 데이터에 다중공선성이 존재하지 않는다고 판단하였다.

Table 2. VIF and CI for each cost drivers

구 분	총중량	전장	FIN 직경
VIF	3.8393	9.4445	5.2427
Condition Index	3.1263	9.5097	20.4572

다음으로 이상치 판단 검정값 별로 유의수준 확인 결과, 초과하는 이상치가 없으며 영향력 조사에서는 Cook Distance 및 DFBETAS 값이 기준치 보다 낮아 영향력도 크지 않다고 할 수 있다.

이에 따라 이상치가 존재 하지 않는 것으로 보고 확인결과 일정한 패턴없이 분포하는 것을 보아 이분산성이 존재하지 않는다. 다음으로 CER 개발 단계를 시행한다.

나. 유도무기체계 CER 개발

1) 회귀분석

가) 유도무기 일반

자료분석 결과에 따라 능형 회귀, 주성분 회귀, 로버스트 회귀, 선형 회귀, 로그선형 회귀 등 여러 가지 회귀분석 방법 중 Fig. 3과 같이 다중선형 회귀 및 로그 선형 회귀 방법을 적용하여 CER 개발 및 통계적 평가를 실시하였으며 그 결과는 Table 3과 같다.

Fig. 3. Regression methods in case of no existence of multicollinearity, outlier and heteroscedasticity

Table 3. The result of CER development and statistical verification

구분	변 수	R ²	R ² _{adj}	회귀계수 검정값
선형 회귀	총중량(A), 최대속도(B), 최대고도(C), 직경(D), 플랫폼(E)	0.93	0.91	(모형)Pr>F : <0.0001 (계수) Pr> t intercept=0.1413, A<0.0001 B=0.0508, C=0.0036 D=0.0187, E=0.0156
로그 선형 회귀	총중량(A), 최대속도(B), 최대고도(C), 직경(D), 플랫폼(E)	0.73	0.67	(모형)Pr>F : <0.0001 (계수) Pr> t intercept=0.403, A=0.003, B=0.609, C=0.073 D=0.136, E=0.956

데이터 분석 결과, 선형 회귀는 5개의 비용인자와 26개의 유도무기체계를 대상으로 개발하였다. 그 결과, R² 값이 0.93으로 적절한 모델로 평가되었으며, F-검정 및 t 검정 결과, 유의 수준 5% 내에서 회귀계수 신뢰성이 보장됨을 확인할 수 있다. 따라서 선형 회귀를 통해 개발된 CER은 적합하며, 다음과 같은 CER을 갖는다.

$$\begin{aligned}
 UC_PROC = & 1.09699 + 0.00977weight \\
 & + 0.00041289speed - 0.00014873altitude \\
 & - 9.2473diameter + 1.58412platform
 \end{aligned}$$

그리고 로그선형 회귀 역시 5개의 비용인자와 26개의 무기체계를 대상으로 개발하였다. 그 결과, F 검정을 통해 유의수준 5% 내에서 전체 회귀 계수 신뢰성

은 입증되었으나, R^2 값이 0.73로 적절하지 못한 모델로 평가되었고, t 검정 결과, 각각의 회귀 계수 신뢰성이 유의 수준 5% 내에서 보장되지 못함에 따라 로그 선형 회귀를 통해 개발된 CER은 적합하지 않다.

그러므로 선형 회귀에 의해 개발된 CER이 통계적 평가에서 모델 적절성 및 회귀계수 신뢰성이 입증됨에 따라 최종 CER로 선정하였다.

나) 공중발사 유도무기

동일한 방법으로 다중선형 회귀 및 로그 선형 회귀 방법을 적용하여 CER 개발 및 통계적 평가를 실시하였으며 그 결과는 Table 4와 같다.

Table 4. The result of CER development and statistical verification

구분	변 수	R^2	R^2_{adj}	회귀계수 검정값
선형 회귀	총중량(A), 전장(B), FIN 직경(C)	0.88	0.85	(모형) $Pr>F : \angle 0.0001$ (계수) $Pr> t $ intercept=0.7970, A=0.0008 B=0.1772, C=0.0615
로그 선형 회귀		0.61	0.52	(모형) $Pr>F : \angle 0.0001$ (계수) $Pr> t $ intercept=0.005, A=0.031, B=0.185, C=0.040

데이터 분석 결과, 선형 회귀는 3개의 비용인자와 16개의 공중발사 유도무기체계를 대상으로 개발하였

다. 그 결과, R^2 값이 0.88로 적절한 모델로 평가되었으며, F 검정 및 t 검정 결과, 유의 수준 5% 내에서 회귀계수 신뢰성이 보장됨을 확인할 수 있다. 따라서, 선형 회귀를 통해 개발된 CER은 적합하며, 다음과 같은 CER을 갖는다.

$$UC_PROC = 0.34484 + 0.00642weight + 1.16605Length - 4.26373Fin$$

그리고 로그선형 회귀 역시 3개의 비용인자와 16개의 공중발사 유도무기체계를 대상으로 개발하였다. 그 결과, F 검정을 통해 유의수준 5% 내에서 전체 회귀 계수 신뢰성은 입증되었으나, R^2 값이 0.61로 적절하지 못한 모델로 평가되어 로그선형 회귀를 통해 개발된 CER은 적합하지 않다.

그러므로 선형 회귀에 의해 개발된 CER이 통계적 평가에서 모델 적절성 및 회귀계수 신뢰성이 입증됨에 따라 최종 CER로 선정하였다.

2) 타당성 검증

타당성 검증은 최종 모델에 대해 실시하였으며 MMRE와 PRED(0.3)을 기준으로 타당성을 평가하였다. 우선 MMRE를 산정하기 위해 MRE를 산정하였으며, 그 결과는 Table 5, Table 6와 같다. 이를 기준으로 MMRE를 산정하면 전체 유도무기 데이터에 대한 MMRE는 0.48이 되며, 공중발사 유도무기의 MMRE는 0.22로 확인되었다. MMRE를 평가하기 위하여 현재

Table 5. MRE for each missile systems

구분	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
MRE	0.985	0.345	0.462	0.150	0.166	0.024	1.795	0.480	0.020	0.440	0.400	0.054	0.127
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
	0.652	0.363	4.334	0.024	0.062	0.035	0.017	0.406	0.334	0.307	0.028	0.080	0.694

Table 6. MRE for air-launched missile systems

구분	1	2	3	4	5	6	7	8
MRE	0.005	0.094	0.421	0.567	0.155	0.083	0.250	0.089
	9	10	11	12	13	14	15	16
	0.084	0.013	0.014	0.027	0.568	0.019	0.695	0.519

사용하고 있는 비용추정 모델들을 조사한 결과 소프트웨어 비용추정 모델로 활용되고 있는 COCOMO II 모델의 MMRE 값이 1.555로 확인되었다. 본 연구에서 제시한 CER의 MMRE 값은 0.48 및 0.22로 상용화된 모델보다 더 낮게 나타났다^[8].

다음으로 Table 5에 의해 유도무기 전체에 대해 $k=16$, $n=26$ 이므로 $PRED(0.3)$ 을 산정하면 $PRED(0.3)=0.62$ 가 되고 공중발사 유도무기는 Table 6에 의해 $k=11$, $n=16$ 이므로 $PRED(0.3)=0.69$ 가 된다. 이는 일반 상용 전산모델의 $PRED(0.3) \approx 0.3$ 임을 감안할 때 개발된 CER 모델의 신뢰성이 높다고 판단할 수 있다^[9].

다. 국내 유도무기 획득단가 모델 개발

앞서 구축한 유도무기 비용추정 모델을 이용한 국내 유도무기 획득단가 CER에 대한 구체적인 구축 방법론에 대하여 다음과 같이 제시한다.

1) 국내 유도무기 획득 비용모델 구축

국내 유도무기 획득비용 분석에는 앞서 언급한 바와 같이 국내에서 독자적으로 연구개발 된, 혹은 외국으로부터 원형을 수입하여 군에 실전 배치되어 운용 중인 유도무기에 대한 비용자료를 바탕으로 한다.

우선 국내 획득 비용모델을 추정하기 위해서는 다음과 같은 절차를 통해 단계별 CER을 추정하고, 다시 이 결과를 대입하여 목표하는 비용추정치를 얻는 작업이 필요하다. 이 절차를 대략적으로 정리하면 국내 획득단가와 미국의 유사장비 단위 획득기간 구축된 모델으로부터, 단위 획득비 추정을 위한 함수관계를 통해 최종 국내 획득단가 추정치를 얻는 구조로 되어 있다. 이를 위한 구체적인 수식으로 정리하면 다음과 같다.

우선 국내 획득단가 추정을 위하여 다음과 같은 함수관계식을 가정한다.

$$UC_KPROC = f_1(UC_PROC) + \varepsilon$$

이는 앞서 제시한 Fig. 2의 회귀식을 나타내며, 다음으로 유사무기 단위 획득비용 UC_PROC 추정을 위하여 다음과 같은 함수관계식이 성립하며 이는 앞서 개발한 CER을 의미한다.

$$UC_PROC = f_2(Cost\ Drivers) + \varepsilon$$

정리하면 국내 획득단가 비용모형은 단위 획득비와의 함수관계로서 다음과 같은 회귀식이 수립된다.

$$UC_KPROC = f_1[f_2(Cost\ Drivers)] + \varepsilon$$

국내 획득단가 추정치를 구하기 위하여 각 관련 제원변수들을 이용하여 UC_PROC 추정치를 구하고 이를 이용하여 UC_KPROC를 추정하는 모형이다. 모형 $f_1()$ 에 대한 추정결과와 앞서 제시한 바와 같이 다음의 식으로 표현된다.

5. 사례 적용 및 분석

가. 모델을 이용한 획득단가 추정

1) 유도무기 획득단가 추정

다음은 앞에서 개발된 모델을 이용하여 실제 국내에 획득하여 운용중인 유도무기체계에 대한 비용추정치 산출결과에 대한 데이터이다. 국내 유도무기 획득단가 추정모델을 이용 실제비용과 추정비용을 알아본

Table 7. Missile system performances

구 분	총중량	최대 속도	최대 고도	직경	플랫폼
유도무기1	366	4284	12200	0.25	1
유도무기2	1080	6120	12200	0.34	0
유도무기3	45	1224	600	0.18	1
유도무기4	215	1224	9100	0.3	1
유도무기5	231	3060	4900	0.2	0
유도무기6	86	3060	15200	0.13	1
유도무기7	231	3060	21300	0.2	1
유도무기8	204	4284	15200	0.21	1
유도무기9	1700	3060	24400	0.33	0
유도무기10	16	2448	4900	0.07	0
유도무기11	1700	5753	25600	0.61	0
유도무기12	12	979	200	0.13	0
유도무기13	1361	2448	16800	0.52	1
유도무기14	86	2448	15200	0.13	1

다. 여기에서 활용된 데이터는 국내 도입 및 실전 배치되어 운용중인 유도무기체계에 대한 것으로 이들을 편의상 ‘유도무기1’, ‘유도무기2’, ‘유도무기3’,..., ‘유도무기14’라 명명하겠다. 비용추정을 위한 제원관련 데이터는 다음 Table 7과 같으며 이를 기반으로 추정치와 실비용 등 결과값은 Table 8과 같다.

Table 8. Actual and estimated costs for each missile systems

(단위 : 억원)

구 분	A	B	C	D	MRE
유도무기1	3.9	4.46	4.8	5.31	0.096
유도무기2	9.2	11.05	11.3	12.22	0.075
유도무기3	1.9	0.67	2.3	3.21	0.283
유도무기4	1.2	1.96	1.5	5.26	0.715
유도무기5	2.0	3.40	2.5	3.8	0.342
유도무기6	1.3	0.80	1.6	0.66	1.424
유도무기7	1.2	1.86	1.5	1.92	0.219
유도무기8	2.2	0.42	2.7	0.69	2.913
유도무기9	12.3	11.57	15.2	15.37	0.011
유도무기10	0.9	0.92	1.1	1.45	0.241
유도무기11	10.6	10.46	13.1	15.02	0.128
유도무기12	0.4	0.58	0.5	2.83	0.823
유도무기13	9.7	9.42	12	12.78	0.061
유도무기14	1.1	0.99	1.4	1.47	0.048

A : UC_PROC B : UC_PROC
C : UC_KPROC D : UC_KPROC

Table 9. Air-launched missile system performances

구 분	총중량	전장	FIN 직경
유도무기1	366.1	4.15	1.13
유도무기2	44.91	1.65	0.34
유도무기3	1360	5.76	1.55
유도무기4	86.18	2.90	0.61
유도무기5	231.3	3.66	1.01
유도무기6	204.1	3.66	1.01

2) 공중발사 유도무기 획득단가 추정

동일한 방법으로 공중발사 유도무기 획득단가 추정 모델을 이용 실제비용과 추정비용을 알아본다. 여기에서 활용된 데이터는 국내 도입 및 실전 배치되어 운용중인 공중발사 유도무기체계에 대한 것으로 이들을 편의상 ‘유도무기1’, ‘유도무기2’, ‘유도무기3’,..., ‘유도무기6’이라 명명하겠다. 비용추정을 위한 제원관련 데이터는 다음 Table 9와 같으며 이를 기반으로 추정치와 실비용 등 결과값은 Table 10과 같다.

Table 10. Actual and estimated costs for air-launched missile systems

(단위 : 억원)

구 분	A	B	C	D	MRE
유도무기1	2.70	4.46	3.45	5.31	0.350
유도무기2	1.05	0.65	1.34	3.21	0.583
유도무기3	9.24	9.42	11.80	12.78	0.077
유도무기4	1.68	0.99	2.15	1.47	0.463
유도무기5	1.84	1.81	2.35	1.92	0.224
유도무기6	0.43	0.41	0.55	0.69	0.203

A : UC_PROC B : UC_PROC
C : UC_KPROC D : UC_KPROC

나. 모델별 추정결과 분석

먼저 Table 8의 데이터들은 앞서 개발한 CER을 이용하여 실제비용과 추정치를 비교한 것으로 예를 들어, 유도무기 1의 경우 미국내 단위 획득비용(UC_PROC)가 4.46억원이며 이에 대한 추정치는 3.9억원으로 나타났다. 그리고 이를 이용 국내 획득단가(UC_KPROC)를 추정한 결과는 4.8억원으로 나타났으며 실제 획득비용은 5.31억원이라는 것을 의미한다. 비용추정 결과를 보면 일단 전체적으로 추정치가 유도무기 6을 제외하고는 실제비용에 비해 과소 추정되는 결과값이 나왔으며 이는 UC_KPROC 와 UC_PROC 간 적합성 부족 문제로 인해 기인하였다고 볼 수 있다. 이는 UC_KPROC 추정시 UC_PROC 의 함수관계에 의해 과소 추정되는 결과를 얻게 되는 것이다. Fig. 4는 실제 UC_KPROC 와 추정치간 적합선 플롯을 나타낸다. 그림을 통해 알 수 있듯이 대각 직선이 실제비용과 추정치가 일치하는 지점을 나타내는 적합선으로 데이터

Fig. 4. UC_KPROC fitness plot for each missile systems

Fig. 5. UC_KPROC fitness plot for air-launched missile systems

들이 직선에 근접해 있는 것을 볼 수 있다. 하지만 데이터의 부족 및 플랫폼, 성능에 따른 비용 편중으로 인해 데이터 분포가 적합선의 양끝으로 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 그리고 유도무기 4, 6, 8, 12의 경우에 적합선에서 위·아래로 일치하는 지점보다는 그 주변으로 산포되어 있는 모습을 보인다. 이는 실제 비용과 추정치의 오차가 크다는 것을 의미한다. 이에 대한 원인으로는 첫째, 이번 연구를 통해 개발한 CER의 특성상 성능 데이터를 기반으로 미국내 유도무기 획득단가를 추정하고 이 추정치를 가지고 국내 유도무기 획득단가를 추정한다. 따라서 실제 획득단가가 추정된 비용과 과도하게 차이가 날 경우에는 이를 설명할 수 있는 변수가 포함되어 있지 않으며, 이는 해당 사업분석 보고서 및 당시 시대적 상황을 통해서 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 둘째, 획득비용이 과소할 경우(1억원 이하)적합성 부족 문제가 두드러지게 나타나며 추정오차를 크게 하는 결과를 초래하였다. 이는 단순히 이번 연구를 통해 개발한 CER을 가지고 설명할 수 없는 변수들에 의해 기인하는 것으로 단순히 성능 데이터만으로 비용을 추정하는데 한계를 보여준다고 할 수 있겠다. 다시 말해 무기체계의 도입에 있어 획득 수량과 같이 가격 변동에 큰 영향을 미치는 변수들의 미반영 등 특정 비용인자의 제한으로 인한 결과라고 할 수 있겠다.

공중발사 유도무기 획득단가 모델을 이용한 추정치 결과를 살펴보면, Fig. 5에서와 같이 적합선 플롯은 일반적 유도무기 획득단가 모델에 비해 보다 유의한

결과를 얻었으며 보다 많은 데이터를 활용한다면 좀 더 활용성 및 신뢰성 측면에서 유의한 모델을 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 추가적으로 공중발사 유도무기 획득단가 모델 추정치 결과에서도 앞서 일반적 모델과 비슷하게 Table 10 유도무기 2에서 나타나는 적합성 결여 문제가 Table 8의 유도무기 4, 6, 8, 12에서 나타난 문제와 비슷한 결과를 나타냈다. 이는 이번 연구에서 제시한 유도무기의 수입시 비용 보정을 위해 미국내 단위 획득비와 국내 획득단가간 1:1 회귀분석을 통한 비용보정 회귀계수의 활용에는 어느 정도 한계가 있다는 것을 보여주며 이는 추가적인 설명변수가 필요할 것으로 보인다.

추정치 결과값을 바탕으로, 즉 최종 모델에 대해 타당성 검증을 실시한 결과는 다음과 같다. 미국내 유도무기 단위 획득비 CER을 개발했을 때와 마찬가지로 여기에서도 MMRE와 PRED(0.3)을 기준으로 타당성을 평가하였다. 우선 MMRE를 산정하기 위해 MRE를 산정하였으며, 그 결과는 Table 8와 Table 10과 같다. 이를 기준으로 MMRE를 산정하면 유도무기 일반 즉 전체 유도무기에 대한 MMRE는 0.52, 공중발사 유도무기의 MMRE는 0.21이 되며, 상용화된 모델 COCOMO II의 MMRE 값 1.555에 비해 낮게 나타나 신뢰성이 높다고 판단할 수 있다⁷⁾.

다음으로 Table 8에 의해 $k=9$, $n=14$ 이므로 PRED(0.3)을 산정하면 PRED(0.3)=0.64가 되며 공중발사 유도무기는 Table 10에 의해 $k=3$, $n=6$ 이므로 PRED(0.3)을 산정하면 PRED(0.3)=0.5가 된다. 이는 모두 일반 상용 전

산모델의 $PRED(0.3) \approx 0.3$ 임을 감안할 때 개발된 CER 모델의 신뢰성이 높다고 판단할 수 있다^[6].

6. 결론 및 향후 연구방향

본 연구는 유도무기체계 획득단가 비용추정모델을 제시한 연구로서 다음과 같은 의의를 가진다.

첫째, 이 연구를 통해 국내 유도무기 획득단가를 외국의 자료로부터 얻은 비용관계식의 함수로서 정리하고, 이를 CER의 구축과 활용에 사용한 점은 나름대로의 성과라 할 수 있다.

둘째, 국방 획득 업무에 있어 초기단계 정보의 다양성을 제공할 수 있는 유도무기체계 비용추정모델을 개발할 수 있는 방법론을 제시함은 물론 이를 통해 무기체계 전반에 걸쳐 이러한 방법론을 폭넓게 활용할 수 있다는데 의의가 있다.

셋째, 기존의 비용추정모델이 가지는 한계를 극복하고, 유도무기의 물리적 데이터 및 기술적 특성치만을 이용하여 획득단가를 추정함으로써 전문적 지식이 없이도 이용가능하며 구매 사업 초기에 유용하게 활용될 수 있다.

향후 연구방향으로는 국방 획득환경의 변화로 국내 연구개발이 활성화됨에 따라 향후 경험 데이터가 지속적으로 축적된다면 국내 데이터를 기반으로 하위 시스템 수준에서 비용추정모델을 개발한다면 모델 적합성 및 신뢰성 차원에서 본 연구보다 향상된 모델을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] 강성진, “비용추정론”, 국방대학교, 2010. 5.
- [2] 강성진, “효율적인 비용관리 방법론”, 국방대학교, 2008. 12.
- [3] 김종덕, “SAS를 이용한 선형회귀분석”, 자유아카데미, 2002. 8.
- [4] 성내경, “SAS/STAT 회귀분석”, 자유아카데미, 2009. 1.
- [5] 정원일 등 3명, “다양한 데이터 특성을 고려한 무기체계 비용추정관계식 개발 연구”, 한국국방경영분석학회, 2010.
- [6] Boehm B. W. et al., Software Cost Estimation With COCOMO II, Prentice Hall, 2000.
- [7] Conte S. D. et al., “Software Engineering Metrics and Models”, Benhamin/Cummings, Menlo Park CA, 1986.
- [8] Horak J. A. et al., Integrated Performance Cost Model(IPCM) System Level Systems, Technomics, Inc, 2005.
- [9] Lund R. E., Tables for an Approximate Test for Outliers in Linear Regression, Technometrics, 17, 1975.
- [10] Stock J. H. and Watson M. W., Combination Forecasts of Output Growth in A Seven-Country Data Set, Journal of Forecasting, 23, pp. 405~430, 2004.