

성능요인에 따른 무기체계 적정가격 추정방안 연구: 헬기발사형 대전차 유도무기를 중심으로

박상현¹⁾ · 강언비²⁾ · 전정환^{*,2)}

¹⁾ 국방기술품질원 해외시장분석팀

²⁾ 경상대학교 산업시스템공학부

A Study on the Estimation of the Proper Price of Weapon System by Performance Factors: Focused on Heli-Launched Anti-Tank Guided Missiles

Sanghyun Park¹⁾ · Eonbi Kang²⁾ · Jeonghwan Jeon^{*,2)}

¹⁾ Global Market Intelligence Team, Defense Agency for Technology and Quality, Korea

²⁾ Department of Industrial and Systems Engineering, Gyeongsang National University, Korea

(Received 21 September 2020 / Revised 27 January 2021 / Accepted 29 January 2021)

Abstract

In government procurement programs, cost estimation and analysis support funding decisions and are the basis for other major decisions, too. Such estimating and analyzing the cost of the weapon systems are crucial in execution of the defense budget. However, existing cost estimations and analyses have focused on domestic R&D projects, thus those are not valid in application to foreign weapon acquisitions. This study aims at foreign weapon systems that are acquired from Direct Commercial Sales. Because the data for price estimation of a foreign weapon is usually not available, we suggest a price estimation model based on performance factors of the weapon. In this study, the proper price of the weapon system is estimated using the parametric cost estimating model. Using the data of helicopter-launched anti-tank guided missiles worldwide, we analyze the effect of each performance factor on the weapon system price by regression analysis, and use step-wise and ridge regression analysis to remove multi-collinearity. This study hopefully contributes to more reasonable decision making on proper price of weapons.

Key Words : Estimation(추정), Proper Price(적정가격), Performance Factors(성능요인), Weapon System(무기체계), Heli-Launched Anti-Tank Guided Missiles(헬기발사형 대전차 유도무기)

* Corresponding author, E-mail: jhjeon@gnu.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

1. 서론

우리나라의 최근 5년(2015~2019)간 무기체계 국외구매 규모는 총 13조 6,809억 원으로 연평균 2조 7,362억 원을 해외 무기체계의 도입을 위해 지출하고 있다^[1]. 해당 기간 우리나라는 세계 7위의 무기 수입국^[2]으로, 무기체계 도입 시 경제성 분석의 중요성이 대두되고 비용대비 효과 및 편익에 대한 국민의 관심이 증대되고 있다.

우리나라의 최근 5년(2015~2019)간 무기체계 상업구매 규모는 총 6조 8,514억 원으로, 연평균 1조 3,703억 원을 해외 무기체계의 상업구매를 위해 지출하고 있다^[1]. 국방기술품질원은 방위사업법 제32조에 따라 군수품의 수입·수출 가격정보를 수집, 제공하여야 하나 시장가격이 존재하지 않는 국방사업의 특성 및 자료의 제한(또는 통제)로 인해 가격정보의 획득률은 40~50% 수준이다. 따라서 무기체계 도입사업에 있어 제안 가격의 적절성 판단이 쉽지 않으며, 방위사업법 제32조에 명시된 군수품 수입·수출 가격정보 수집 관리에도 제한이 있는 실정이다. 그러나 상업구매 등 무기체계 국외도입 사업에서 전순기 비용을 절감하기 위한 가장 중요한 요인은 최적의 계약가격 결정이다. 따라서 막대한 규모의 국방예산을 고려할 때, 국방비의 효율적인 집행을 위한 무기체계 적정가격에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다.

본 연구에서는 세계적인 국방분야 시장분석 및 컨설팅 기업인 IHS Jane's Information Group에서 제공하는 헬기발사형 대전차 유도무기체계의 제원 및 성능요인과 단가 정보를 활용하여 적정 단가를 추정할 수 있는 가격분석 추정 기법에 대하여 제시하였다. 국방분야에서 일반적으로 사용되는 추정 기법으로는 대상 무기체계의 데이터와 가장 유사한 과거 무기체계의 데이터의 비교를 통한 유사추정(Analogy), 회귀분석과 같이 비용을 종속변수로 두고 주요인자간의 관계식을 도출하여 추정하는 모수추정(Parametric), 체계의 가장 하위단계부터 세부적인 추정을 통해 상위단계로 비용을 종합하는 공학적추정(Engineering), 전문가들의 공학적 판단을 이용하는 전문가추정 등이 있다^[3]. 본 연구에서는 자료의 획득 및 공개 제한, 분석기간의 부족과 같은 국외구매 사업의 특성^[3]을 고려하여 연구의 방법론으로 모수추정기법(Parametric Cost Estimating Technique)을 채택하여 다중회귀분석 및 능형회귀분석을 통해 무기체계의 성능요인과 단가 사이의 관계를

분석하였다. 기존의 무기체계 도입비용 관련 연구는 대부분 선행연구, 사업분석 및 국내연구개발사업에서의 비용분석(추정)을 연구대상으로 하였다. 그러나 본 연구는 무기체계 도입단가를 연구대상으로 설정하였으며, 이를 통해 상업구매 시 제안가격의 적정성 여부를 판단하기 위한 기초자료로 활용 가능할 것으로 판단하였다.

본 연구의 구성과 내용은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 본 연구와 관련된 문헌연구들을 살펴보았다. 3장과 4장에서는 본 연구의 연구방법을 소개하고, 이를 실행한 결과값을 제시하였다. 5장에서는 결과값을 바탕으로 다중회귀분석과 능형회귀분석을 실행하였으며, 6장에서는 이에 대한 통계적 검정을 통해 최종 적정 가격 추정모형을 도출하였다. 7장에서는 연구 결론 및 제한사항을 제시하였다.

2. 문헌연구

무기체계 획득에는 천문학적인 예산이 소요되므로 무기체계의 적정 도입가격을 추정하려는 시도는 오래전부터 있어왔으며, 본 연구에서는 이를 위해 비용추정관계식(Cost Estimating Relationships, CER)을 통해 도입비용을 추정하는 모수추정기법을 이용하고자 한다.

모수추정기법은 1950년대 미국의 RAND 연구소에서 항공기의 개발 비용 추정을 위해 처음 사용되었다. 회귀분석 및 조정계수 등을 이용하여 비용을 종속변수로 두고 수량, 일정, 체계 특성 등의 비용인자(Cost Factor)를 설명변수로 설정한 비용추정관계식을 구축하고, 이를 통해 전체 비용을 추정한다. 전산모델은 여러 비용추정관계식과 데이터베이스를 내장하고 있는 것으로 모수추정기법을 체계화한 것으로 볼 수 있으나, 많은 수가 이를 개발한 기업 또는 연구기관 내부에서 활용되므로 국내에서 활용 가능한 상용모델은 매우 제한되는 실정이다^[3].

비용추정관계식은 종속변수인 비용(Cost)과 독립변수인 비용인자(Cost Factor)들 사이의 관계를 설명하고, 비용인자의 변화에 따라 비용이 어떻게 변화하는지를 표현한 수식이며^[4], CER을 추정하기 위해서는 회귀분석 방법이 가장 적합하다고 알려져 있다^[5]. 일반적인 다중회귀모형의 형태는 아래의 식 (1)과 같다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \epsilon \quad (1)$$

β 는 회귀계수로 모집단의 모수를 나타내며, ϵ 는 잔차를 의미한다. 일반적으로 잔차의 합이 최소가 될 때의 실제 값에 가장 근접한 회귀식으로 판단하며, 최소제곱법(Least Squares Method)을 사용하여 ‘잔차의 제곱합이 최소’가 되는 회귀선을 가장 적합한 회귀식으로 본다.

국내 무기체계 CER과 관련된 연구는 많지 않으나 국방과학연구소 및 국방기술품질원에서는 유도무기, 어뢰, 전차 및 소프트웨어 등에 대한 비용추정 모델을 개발하기 위한 연구가 이루어졌다. 유도무기체계에 대한 비용추정 연구는 전문가의 사전지식을 기반으로 비용을 추정하기 위하여 해당 체계를 총 17개 하부체계로 나누고, 요구되는 설계 및 성능요인에 해당하는 하위체계를 선별하였다. 이를 바탕으로 각 하위체계별 전문가들로부터 설문을 통해 비용인자의 종류, 범위, 수준을 결정하여 확률분포에 따른 비용추정 결과를 제시하였다⁴⁾. 어뢰 및 전차 체계에 대해서도 전문가의 사전지식을 바탕으로 비용을 추정하기 위해 해당 체계를 WBS(Work Breakdown Structure) 단계에 따라 나누고, WBS 단계별로 전문가 인터뷰 및 설문을 통해 CER을 개발하였다. 국방소프트웨어분야에서는 전문가를 대상으로 해당 소프트웨어를 개발하기 위한 노력 및 규모, 개발환경, 기능 등에 대한 설문을 통해 비용인자를 식별하여 CER을 개발하였다⁶⁾.

하지만 상기 연구는 신뢰성 있는 원가 및 단가 자료 확보의 제한으로 전문가 설문을 기반으로 추정식을 개발하였으며, 따라서 설문조사 과정에서의 전문가 교체 및 부재, 주관 개입 등으로 설문결과에 대한 객관성 보장이 제한되었다⁴⁾.

3. 연구방법

3.1 연구 대상 선정

본 연구에서는 IHS Jane's Information Group에서 제공하는 헬기발사형 대전차 유도무기의 성능 및 단가 데이터를 이용하여 해당 무기체계의 규격·성능요인과 단가의 관계를 통계적 기법을 이용하여 분석한다. 무기체계의 규격·성능요인 및 단가 데이터를 수집하고 분석하기 위해 이용할 수 있는 정보원으로는 Forecast International, Teal Group 등 국방분야 전문 컨설팅 업체, 언론 보도자료, 무기체계 개발사 홍보자료 등 다양한 자료가 존재하지만, 본 연구에서는 125명 이상의

분석가 및 500명 이상의 외부 전문가를 보유한 국방분야 최대의 컨설팅 업체인 IHS Jane's Information Group에서 제공하는 데이터를 활용하였다. 무기체계의 실제 도입가격(실적가) 데이터베이스를 활용하지 않은 이유는 국방분야 획득사업의 보안성, 폐쇄성으로 정보 공개가 불가능할 뿐만 아니라, 우리 군의 소요를 만족하는 특정 무기체계만을 운용하므로 충분한 성능/단가 데이터의 확보가 불가하였기 때문이다. IHS Jane's Information Group에서 제공하는 헬기발사형 대전차 유도무기 22개 체계에 대해 81개 데이터를 수집하였으며, 분석의 설명변수로는 중량, 사거리, 길이, 직경, 관통력, 탐색기 종류를 선정하였다.

3.2 연구수행 절차

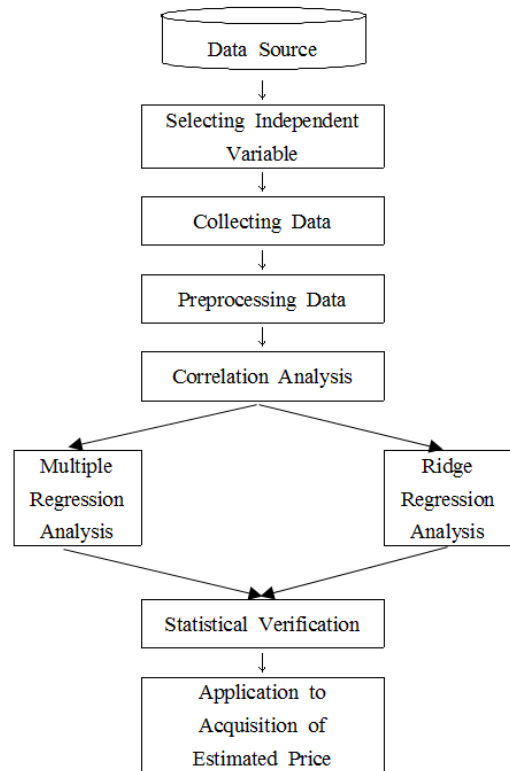


Fig. 1. Research process

무기체계 상업구매 시 제안가격의 적정성 여부를 판단하기 위해 해당 무기체계의 제3국 판매 가격정보 등을 활용할 수도 있지만, 정보의 공개가 이루어지지 않고 일몰일가의 법칙이 존재하지 않는 국방사업의

특성상 가격정보를 획득할 수 없는 경우가 다수 발생한다. 따라서 가격정보를 획득할 수 없는 경우에도 제안가격의 타당성을 판단할 수 있는 기법의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 앞서 선별한 헬기발사형 대전차 유도무기 자료를 통계분석 소프트웨어인 SPSS와 R을 이용하여 성능요인에 따라 가격추정이 가능한 회귀식을 도출하였으며, 본 연구가 제안하는 분석 프로세스는 Fig. 1에 제시하였다. 본 연구는 설명변수 선정, 데이터 수집, 데이터 전처리, 변수 간 상관분석, SPSS를 이용한 다중회귀분석, R을 이용한 능형회귀분석, 회귀모형 검증 및 결과 해석으로 구성된다. 다음 장에서는 다중회귀분석과 능형회귀분석을 이용하여 해당 무기체계의 가격추정식을 개발 및 분석하였다.

3.3 회귀모형 개발 시 고려사항

설명변수를 선정하고, 수집된 자료를 분석하여 적정가격을 추정하기 위해서는 충분한 수의 데이터를 확보하는 것이 필수적이다. 중심극한정리에 따라 표본이 정규분포에 근접하기 위해서는 통계적으로 20개 이상의 데이터가 필요한^[7] 것으로 알려져 있다. 또한 적정가격 추정 시 선정된 설명변수들 사이에서 다중공선성이 존재할 수 있으므로 이에 대한 고려도 필요하다. 다중공선성이 존재한다는 말은 설명변수간 공통적인 정보를 포함하고 있음을 의미하며, 이로 인해 회귀계수의 표준오차를 크게 만든다. 따라서 다중공선성이 존재할 경우 구축된 회귀식 및 회귀계수의 크기와 부호를 신뢰할 수 없게 된다^[8]. 다중공선성은 회귀모형의 설정보다는 수집한 자료 자체의 결함인 경우가 많으며, 회귀식의 잔차 분석을 통해서는 감지할 수 없기 때문에 종속변수에 대한 분산팽창계수(Variation Inflation Factor, VIF) 값을 계산하여 확인한다. VIF 값을 계산하는 수식은 식 (2)와 같다.

$$VIF_k = 1 / (1 - R_k^2) \tag{2}$$

식 (2)에서 R_k^2 는 X_k 를 종속변수로, 나머지 설명변수들을 독립변수로 하여 얻어지는 회귀방정식의 결정계수를 의미한다. 일반적으로 VIF 값이 10 이상일 때 종속변수와 해당 설명변수 사이에 다중공선성이 있다고 판단한다^[8]. 자료의 추가 확보 및 재구성, 다중공선성이 높은 설명변수의 삭제 등을 통해 다중공선성의 해소가 가능하며, 또는 최소제곱법의 대안으로서 능형회귀분석(Ridge Regression) 또는 주성분 회귀분석(Principal

Components Regression)을 사용할 수 있다. 회귀모형별 주요 특징은 Table 1에 나타내었다.

다중공선성 해소를 위해 본 연구에서 사용한 능형회귀분석의 개념은 다음과 같다. 능형회귀분석은 다중회귀분석에서 가정하는 최적선형불편추정량을 무시하여 어느 정도의 편의(Bias)를 감수하는 대신 분산의 크기를 대폭 줄여 최소제곱법에 의한 다중회귀계수보다 더 안정적인 회귀계수를 구할 수 있는 방법이다^[10]. Hoerl과 Kennard(1970)이 제안한 일반적인 능형회귀모형의 형태는 식 (3)과 같다.

Table 1. Key features of each regression model^[9]

회귀모형	자료특성	비고
주성분	다중공선성 존재	주성분 분석으로 구한 주성분 계수를 사용. 편향은 있지만 안정된 회귀계수 추정
능형		고의적으로 편향된 추정량으로 전체 추정량의 분산을 감소시키는 회귀계수 추정
가중	이분산성 존재	변수변환을 통해 분산을 안정화한 뒤 OLS(Ordinary Least Squares) 수행
다중선형	일반적인 자료	불편추정량들 중에서 최소 분산을 갖는 회귀계수 추정
로그선형	표준편차 과다	로그 변환하여 선형성을 부여함으로써 변이 완화
로버스트	이상치 존재	표본의 수가 작으면서 이상치가 존재할 때 잔차에 작은 가중치를 부여하여 이상치의 영향력을 감소

$$\hat{q} = \sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2 + \lambda \sum_{i=1}^k \beta_i^2 \tag{3}$$

여기서 $\hat{q} = \sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ 는 최소제곱법을 이용한 회귀계수 추정방법의 잔차제곱합(RSS)이며, 추가된 항 $\lambda \sum_{i=1}^k \beta_i^2$ 은 추정된 회귀계수를 0 방향으로 감소시켜 분산과 편의 사이에서 모형이 최적화가 될 수 있도록 한다(여기서 λ 는 검정MSE 최소화를 위한 수축 페널

티(shrinkage penalty), β_i 는 회귀계수). Hoerl과 Kennard (1970)은 식 (3)의 종속변수를 벡터화, 독립변수를 행렬화하여 식 (4)와 같이 변환하였으며, 이를 통해 능형회귀계수의 추정방법을 제안하였다.

$$\hat{q}(k) = (X^T X + kI)^{-1} X^T Y \quad (4)$$

식 (4)의 능형회귀계수 $\hat{q}(k)$ 는 다중회귀식의 회귀계수 β 와 같은 선형관계에 있으며, 이때 능형매개변수 k 의 변화는 능형회귀모형의 평균제곱오차, 분산과 편의에 영향을 준다. k 의 증가에 따라 모형의 분산은 감소하고 편의는 증가하나, 평균제곱오차는 k 의 증가에 따라 감소하다가 특정 능형매개계수 k 이후로 증가하며 능형회귀계수 $\hat{q}(k)$ 는 안정화된다. 회귀계수가 안정화되는 k 값의 결정이 모형의 성능을 결정하며, 이때의 k 를 결정하는 방법으로는 Ridge Trace 방법과 대입법을 통해 함수를 그려 계산하는 방법 등이 있으나 본 연구에서는 능형매개계수 k 의 산정을 위해 Hoerl 등이 제안한 방법을 함수화한 R glmnet 패키지의 cv.lambda 함수를 사용하였다. 이는 비교적 좋은 결과도출 및 적합성 우수 등의 장점이 있는 것으로 알려져 있다^[11].

4. 사례 연구

본 장에서는 제3장에서 제안한 통계적 기법을 활용한 무기체계 가격추정 프레임워크를 바탕으로 헬기발사형 대전차 유도무기의 가격추정을 수행한 사례연구의 과정과 결과를 설명한다.

4.1 설명변수 선정

모수추정기법은 모집단을 대별할 수 있는 표본을 대상으로 설명변수와 비용(가격)과의 통계적이며, 논리적인 관계를 도출하는 과정이다. 따라서 적절한 설명변수의 선정을 통해 체계의 고유한 특성이 대별될 수 있어야 하며, 비용(가격)과 인과관계에 있으면서 대상 체계의 일반화가 가능해야 한다. 표본과 비용인자가 적절히 선정되지 않으면 왜곡된 분석으로 인해 비용(가격)추정식이 편향될 수 있으며, 일반화를 저해할 수 있으므로 본 연구에서 선정된 설명 변수는 유도무기체계 비용분석 관련 연구와 각 군의 ROC 작성 지침, 그리고 Price, True FACET과 같은 상용 전산모

델을 참조하여 선정하였다. 선정된 변수는 종속변수인 무기체계 단가를 포함하여 6개의 연속형 변수와 탐색기 종류의 1개 범주형 변수로 구성되며, 단위와 정의를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Collected data(variables) and definitions

변수	단위	정의
Unit Price	USD	Jane's DB의 무기체계 단가
Weight	kg	발사체 중량
Range	km	발사체 도달가능 최대 사거리
Diameter	m	발사체 직경
Length	m	발사체 길이
Penetration	m	콘크리트 구조물 관통력
Seeker Type	n/a	탐색기 종류(No Seeker, IR, RF, Laser, SAL, TV)

4.2 데이터 수집

전 세계 헬기발사형 대전차 유도무기의 규격·성능요인과 단가의 관계를 분석하기 위해 IHS Jane's Information Group을 데이터베이스로 이용하였다. IHS Jane's Information Group은 국방부, 정보사령부, 합참, ADD, KIDA 등 우리나라의 50여 개 국방관련 기관 및 업체가 기술/시장/제원 정보를 획득하기 위해 구독하는 매우 신뢰성 있는 정보원이다. IHS Jane's Information Group은 무기체계 가격분석을 위해 125명 이상의 내부 전문가와 500명 이상의 외부 정보원들로 구성된 조직, 그리고 10명 이상의 전 세계 국방 및 국가안보 전문 컨설턴트로 구성되는 중앙 컨설팅 팀을 운영하고 있다(2019. 3. 기준).

보안 및 자료의 통제 등으로 신뢰성 있는 실거래 데이터의 확보가 어려운 국방 사업의 특성상 IHS Jane's Information Group에서 제공하는 헬기발사형 대전차 유도무기 22개 체계(파생형 포함 81개 체계)에 대한 규격·성능요인 데이터를 수집하였다.

통상 단가 자료의 경우 기준연도 및 통화에 따른 차이를 보정하는 정규화 과정이 필요하나, IHS Jane's의 Market Forecast에서는 2019년 미 달러(경상가) 기준으로 환산된 자료를 제공하여 별도의 정규화는 생략하였다. 수집 데이터 현황 및 기초통계량은 Table 3, 4, 5와 같다.

Table 3. Collected data status

No	Model	Unit Price	Weight	Range	Length	Diameter	Penetration	Seeker Type
1	AT-9 (9M120)	32,000	42.5	6.0	1.83	0.130	0.8	No Seeker
2	HOT	30,909	23.5	4.0	1.27	0.136	0.8	No Seeker
3	BGM-71D TOW	45,000	21.5	3.8	1.51	0.152	0.9	No Seeker
4	AT-6 (Spiral)	32,000	30.0	5.0	1.63	0.130	0.6	No Seeker
5	ZT-35 (Ingwe)	27,000	28.5	5.0	1.75	0.127	1	No Seeker
⋮	⋮							
81	AGM-114F Hellfire	55,030	48.6	7.0	1.8	0.178	1.0	SAL

Table 4. Basic statistics of collected data (Continuous type)

변수	Min.	Mean.	Max.	Std. Error
Unit Price	16,540	53,364	165,000	38,546.111
Weight	18.8	32.3	70.0	13.753
Range	3.00	5.68	25.00	3.050
Length	1.16	1.53	2.75	0.295
Diameter	0.130	0.160	0.190	0.016
Penetration	0.60	0.83	1.40	0.190

Table 5. Basic statistics of collected data (Category type)

변수	빈도 수
No Seeker	47
Semi-Active Laser(SAL)	24
Fire and Forget millimeter wave Radar(RF)	5
Infra-Red(IR)	3
Electro-Optical(TV)	1
Laser	1

4.3 데이터 전처리

수집한 데이터 중 표본 수부족으로 해당 탐색기 종류에 대한 대표성을 가질 수 없는 데이터를 제거하였다. 이에 따라 RF, IR, TV, Laser 방식이 각각 5, 3, 1, 1의 빈도수를 가져 제거되었으며, 산포도를 통해 판단한 결과 수집한 데이터에서 종속함수인 단가와 각 설명변수의 관계는 지수함수 형태를 가지는 것으로 판단하였다. 특히 관통력과 사거리의 경우 전형적인 지수함수 그래프 형태를 나타내며, 유도무기체계의 비용 추정에 관련된 기존 연구^[9,12,13] 역시 지수함수 형태를 가정하고 있다. 단가와 헬기발사형 대전차 유도무기의 규격·성능 요인의 관계는 식 (5)와 같다.

$$Unit\ Price = \alpha (Independent\ Variables)^\beta \quad (5)$$

식 (5)의 경우 단위 크기로 인한 문제와 분석의 편의를 위해 밑이 e인 자연로그를 취해 log 변환된 값을 이용하여 회귀식을 구축하였으며, 구축된 선형회귀식의 형태는 식 (6)과 같다.

$$\ln (Unit\ Price) = \ln \alpha + \beta \ln (Independent\ Variables) \quad (6)$$

전처리 후의 데이터 현황은 Table 6에, 기초통계량은 Table 7, 8에 나타내었다.

Table 6. Preprocessing(log conversion) data status

No	Model	ln(Unit Price)	ln(Weight)	ln(Range)	...	Seeker Type
1	AT-9 (9M120)	10.373	3.750	1.792		No Seeker
2	HOT	10.339	3.157	1.386		No Seeker
3	BGM-71D TOW	10.714	3.068	1.335		No Seeker
4	AT-6 (Spiral)	10.373	3.401	1.609		No Seeker
5	ZT-35 (Ingwe)	10.204	3.350	1.609		No Seeker
⋮						
71	BGM-71D TOW	10.714	3.068	1.335		No Seeker

Table 7. Basic statistics of preprocessed data (Continuous type)

변수	Min.	Mean.	Max.	Std.Error
ln(Unit Price)	9.71	10.489	12.01	0.701
ln(Weight)	2.93	3.319	3.95	0.411
ln(Range)	1.1	1.553	2.3	0.386
ln(Length)	0.15	0.378	1.01	0.178
ln(Diameter)	-2.06	-1.851	-1.73	0.100
ln(Penetration)	-0.51	-0.230	0.34	0.224

Table 8. Basic statistics of preprocessed data (Category type)

변수	빈도 수
No Seeker	47
Semi-Active Laser(SAL)	24

4.4 상관분석

Table 9. Correlation coefficient between variables

	ln(Weight)	ln(Range)	ln(Length)	ln(Diameter)	ln(Penetration)	No Seeker	SAL
중속변수	0.875	0.895	0.768	0.672	0.871	-0.855	0.855
ln(Weight)	1.000	0.974	0.867	0.672	0.843	-0.923	0.923
ln(Range)		1.000	0.905	0.695	0.875	-0.924	0.924
ln(Length)			1.000	0.541	0.854	-0.767	0.767
ln(Diameter)				1.000	0.644	-0.890	0.890
ln(Penetration)					1.000	-0.823	0.823
No Seeker						1.000	-1.000
SAL							1.000

중속변수인 ln(Unit Price)와 설명변수인 ln(Weight), ln(Range), ln(Length), ln(Diameter), ln(Penetration) 및 탐색기 종류(No Seeker, SAL)의 6개 무기체계 특성에 대한 상관관계 분석 결과 Table 9과 같이 대부분의 변수 간 상관계수가 매우 높아 다중공선성의 존재가 의심되었으며, 중속변수에 대한 각 설명변수의 유의확률은 모두 0.000 수준에서 유의하여 모든 설명변수가 유의한 것으로 나타났다.

다중공선성에 대한 정확한 진단을 위해 VIF 값을 계산한 결과 Table 10과 같이 ln(Weight), ln(Range), ln(Diameter), Seeker Type(SAL)에서 중속변수와의 VIF 값이 10 이상으로 나타나 다중공선성이 존재함을 확인하였다. Seeker Type은 범주형 변수이므로 Seeker Type(No Seeker)는 분석에서 제외되었다.

Table 10. VIF value per variable

변수	VIF
ln(Weight)	39.228
ln(Range)	37.283
ln(Length)	8.602
ln(Diameter)	20.451
ln(Penetration)	5.089
Seeker Type(SAL)	87.059

5. 다중회귀분석 및 능형회귀분석

5.1 다중회귀분석

전처리를 마친 데이터를 사용하여 SPSS ver.25를 통해 다중회귀모형을 도출하였다. 상관분석 및 VIF 값 계산 결과 중속변수와 일부 설명변수 사이에 다중공선성이 존재하는 것을 확인하였으므로 단계선택(Stepwise) 방법을 이용하여 다중회귀모형을 구축하였다. 단계선택방법에서 사용된 설명변수 선택의 기준은 회귀계수의 t-검정 유의확률로서, 유의확률이 0.05 이하일 때 모형에 해당 변수가 투입되며 변수는 유의한 수준으로 투입된다. 이 때, 새로운 변수가 투입됨에 따라 기존에 투입되었던 변수의 유의확률이 0.1 이상으로 커지면 해당 변수는 모형에서 제거된다. 다중회귀분석 결과 도출된 회귀모형은 식 (7)이다.

$$\ln(\text{Unit Price}) = 9.083 + 1.507\ln(\text{Range}) + 1.507\ln(\text{Penetration}) - 1.555\ln(\leq \text{ngth}) \quad (7)$$

분석 결과 $\ln(\text{Weight})$ 와 $\ln(\text{Diameter})$, Seeker Type의 3개 변수가 삭제되었으며, 이 때 다중회귀모형의 회귀계수에 대한 t-검정 유의확률과 VIF 값은 Table 11에 나타내었다. 회귀계수에 대한 t-검정 유의확률은 0.001 이하로 세 설명변수 모두 채택 가능하며, VIF 값도 10 이하로 다중공선성이 해소되었음을 알 수 있다. 분석 결과, 종속변수인 헬기발사형 대전차 유도무기 단가의 자연로그값에 대하여 설명변수인 $\ln(\text{Range})$ 와 $\ln(\text{Penetration})$ 은 양의 관계를, $\ln(\text{Length})$ 는 음의 관계를 가짐을 알 수 있다. 즉, 헬기발사형 대전차 유도무기의 단가에 대하여 사거리와 관통력은 양의 관계를 갖지만 길이는 음의 관계를 보이며, 이는 무게중심의 이동에 민감하고 기동성 확보를 중요시하는 회전익항공기의 특성 때문인 것으로 판단된다. 모형을 이용한 추정가와 무기체계 단가 사이의 관계는 Fig. 2에 나타내었다.

Table 11. T-test and VIF value of multiple regression model

변 수	T	p	VIF
$\ln(\text{Range})$	6.868	0.000	6.988
$\ln(\text{Penetration})$	4.867	0.000	4.701
$\ln(\text{Length})$	-3.507	0.001	6.070

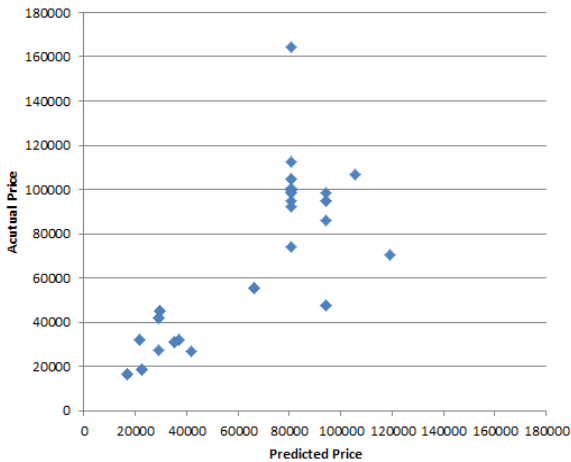


Fig. 2. Actual by predicted plot(Multiple regression)

5.2 능형회귀분석

마찬가지로 전처리를 마친 데이터를 사용하여 R ver.3.5.3 Great Truth를 이용하여 능형회귀모형을 도출하였다. 능형회귀분석은 편의(Bias)를 통해 다중공선성이 있더라도 회귀모형 구축이 가능하므로 다중공선성 해소를 위한 별도의 단계를 거치지 않았으며, R의 car와 glmnet 패키지를 이용하여 능형회귀모형을 구축하고 lambda 계산에는 cv.lambda 함수를 사용했다. 능형회귀분석 결과 도출된 회귀모형은 식 (8)과 식 (9)이다.

$$\ln(\text{Unit Price}) = 8.962 + 0.329\ln(\text{Weight}) + 0.535\ln(\text{Range}) - 0.140\ln(\leq \text{ngth}) + 0.086\ln(\text{Diameter}) + 1.065\ln(\text{Penetration}) \quad (8)$$

If Seeker Type = SAL,

$$\ln(\text{Unit Price}) = 9.138 + 0.329\ln(\text{Weight}) + 0.535\ln(\text{Range}) - 0.140\ln(\leq \text{ngth}) + 0.086\ln(\text{Diameter}) + 1.065\ln(\text{Penetration}) \quad (9)$$

탐색기 종류에 따라 식 (8)은 No Seeker, 식 (9)는 SAL Type 탐색기에 해당하며 두 식은 상수항에 차이가 있다. 분석 결과, 종속변수인 헬기발사형 대전차 유도무기 단가의 자연로그값에 대하여 설명변수인 $\ln(\text{Weight})$, $\ln(\text{Range})$, $\ln(\text{Diameter})$, $\ln(\text{Penetration})$, Seeker Type(SAL)은 양의 관계를 갖지만, $\ln(\text{Length})$ 은 음의 관계를 가짐을 알 수 있다. 즉, 헬기발사형 대전차 유도무기의 단가에 대하여 중량, 사거리, 직경, 관통력은 양의 관계를 갖지만 길이는 음의 관계를 보이며, 다중회귀분석의 결과와 마찬가지로 이는 무게중심의 이동에 민감하고 기동성 확보를 중요시하는 회전익 항공기의 특성 때문인 것으로 판단된다. 또한, 탐색기의 추가는 헬기발사형 대전차 유도무기 단가에 상승요인으로 작용하며, 능형회귀분석의 경우 편의(Bias)된 추정량으로서 다중회귀분석과 비교하여 각 회귀계수의 절댓값이 감소했음을 알 수 있다. 모형을 이용한 추정가와 무기체계 단가 사이의 관계는 Fig. 3에 나타내었다.

분석과정에서 다중회귀분석의 경우 일부 변수가 삭제되며 각 성능요인의 회귀계수가 비슷한 수준으로 나타났으나, 능형회귀분석에서는 삭제되는 변수가 없으므로 해당 성능요인이 무기체계 단가에 미치는 영향을 보다 구체적으로 유추할 수 있다.

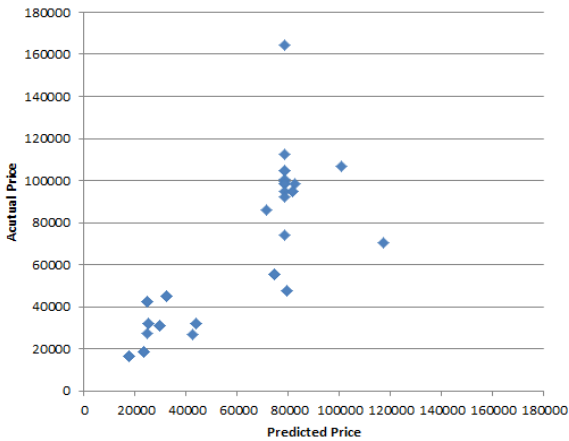


Fig. 3. Actual by predicted plot(Ridge regression)

6. 통계적 검정 및 적정가격 추정모형

6.1 통계적 검정

비용추정관계식(CER)의 정확도 평가는 수정설명계수(Adj.R²) 값과, 실제 값과 추정치의 절대편차 평균인 MMRE(Mean Magnitude of Relative Error)를 사용한다⁴⁾. 기존 유사 연구에서는 Adj.R²가 80 % 이상, MMRE가 50 % 이하인 경우 해당 모형은 적합한 것으로 판단⁴⁾ 하였으며, 본 연구에서도 해당 기준을 따랐다. 도출한 두 회귀모형에 대한 수정 설명계수와 MMRE는 Table 12에 나타내었으며, 두 모형의 Adj.R² 값은 각각 85.4 %, 83.8 %로 도출된 회귀모형은 설명변수의 변동에 따른 무기체계 단가의 변화를 80 % 이상의 비율로 잘 설명하고 있다. 또한 두 모형의 MMRE 역시 각각 20.1 %, 23.2 %로, 무기체계 단가와 추정치에 대한 상대적 오차가 20~25 % 수준이므로 모형의 정확도는 타당함을 알 수 있다.

Table 12. Adj.R² and MMRE of the development regression model

회귀모형	Adj.R ²	MMRE
다중회귀모형	85.4 %	20.1 %
능형회귀모형	83.8 %	23.2 %

6.2 최종 적정가격 추정모형

다중회귀분석 및 능형회귀분석을 통해 개발한 가격

추정 모형은 전처리 단계에서 로그변환을 거쳐 도출하였다. 따라서 종속변수인 Unit Price를 구하기 위해 도출한 회귀모형을 지수, 자연상수 e를 밑으로 하는 지수함수 형태로 변환하여 최종 적정가격 추정모형을 개발하였다. 식 (10)은 다중회귀분석을 이용한 적정가격 추정모형, 식 (11), (12)는 능형회귀분석을 이용한 적정가격 추정모형이며 각각 No Seeker, SAL Type의 탐색기에 해당한다.

$$Unit Price = e^{9.083 + 1.507 \ln(Range) + 1.507 \ln(Penetration) - 1.555 \ln(\leq ngth)} \quad (10)$$

$$Unit Price = e^{8.962 + 0.329 \ln(Weight) + 0.535 \ln(Range) - 0.140 \ln(\leq ngth) + 0.086 \ln(Diameter) + 1.065 \ln(Penetration)} \quad (11)$$

If Seeker Type = SAL,

$$Unit Price = e^{9.138 + 0.329 \ln(Weight) + 0.535 \ln(Range) - 0.140 \ln(\leq ngth) + 0.086 \ln(Diameter) + 1.065 \ln(Penetration)} \quad (12)$$

분석을 통해 도출된 회귀모형을 이용하여 헬기발사형 대전차 유도무기의 규격·성능요인과 단가 사이의 관계를 파악하였다. 다중회귀분석 결과, 사거리와 관통력은 헬기발사형 대전차 유도무기의 단가와 양의 관계를 가지나, 길이는 음의 관계를 갖는다. 능형회귀분석의 결과를 통해서도 중량, 사거리, 직경, 관통력 및 탐색기의 추가는 단가에 양의 관계를, 길이는 음의 관계를 가짐을 알 수 있다. 또한, 능형회귀분석의 경우 편의(Bias)된 추정량을 제공하여 다중회귀분석 대비 각 회귀계수의 절댓값이 감소하였다. 도출된 적정가격 추정모형의 회귀계수를 통해 헬기발사형 대전차 유도무기의 단가를 결정하는 핵심 성능요인은 사거리와 관통력임을 알 수 있으며, 이에 반해 규격요인인 중량, 직경, 길이가 미치는 영향은 상대적으로 작았다. 기술요인인 탐색기 적용 여부는 단가에 상승요인으로 작용하였다.

7. 결론

본 연구에서는 IHS Jane's Information Group에서 제공하는 헬기발사형 대전차 유도무기 22개 체계에 대한 데이터 81건을 활용하여 규격·성능요인과 단가 사이의 관계를 살펴보았다. 다중회귀분석과 능형회귀분

석을 이용하여 종속변수인 헬기발사형 대전차 유도무기의 자연로그값과 중량, 사거리, 길이, 직경, 관통력, 탐색기 종류 등 무기체계의 물리적 특성의 자연로그값 사이의 관계를 분석하였고, 통계적 검정과정에서는 수정결정계수와 MMRE 값을 이용하여 모형의 적합성 여부를 검증하였다. 그리고 두 회귀모형을 변환하여 최종적으로 헬기발사형 대전차 유도무기 단가를 나타내는 식을 유도하였다. 두 회귀모형의 회귀계수를 통해 헬기발사형 대전차 유도무기의 단가를 결정하는 핵심 성능요인은 사거리와 관통력임을 알 수 있으며, 이에 반해 규격요인인 중량, 직경, 길이가 미치는 영향은 상대적으로 작았다. 기술요인인 탐색기 적용 여부는 단가에 상승요인으로 작용하였다.

본 연구에서는 IHS Jane's에서 제공하는 헬기발사형 대전차 유도무기의 단가 및 규격·성능요인 데이터를 기반으로 무기체계의 물리적 특성과 단가 사이의 관계를 추정하는 모형을 개발하였고, 통계적 검정을 통해 모형의 신뢰성과 활용성을 제고하였다. 본 연구는 다음과 같은 의의를 가진다.

첫째, 가격정보 획득이 불가능한 해외무기체계 도입 시 제안가격의 적정성 여부를 판단하는 기초 자료 및 협상의 근거로 활용이 가능하며, 합리적인 획득예산의 집행에 기여할 수 있다.

둘째, 개발된 헬기발사형 대전차 유도무기의 가격추정 모형은 소요군 구매요구서 및 제작사 제안서를 통해 수집 가능한 정량적이고 수치로 표현되는 정보를 이용한다. 따라서 추정과정 및 결과에 객관성을 확보 가능할 뿐만 아니라, 모형 사용자의 수준과 관계없이 추정 결과에 일관성을 보장할 수 있다.

셋째, 본 연구에서 제시된 모형은 헬기발사형 대전차 유도무기에 한해 유효하나, 연구에서 제안된 모형 개발 프로세스와 논리는 다른 무기체계에도 확장하여 적용 가능하다. 그러므로 추후 헬기발사형 대전차 유도무기가 아닌 타 무기체계의 상업구매 시에도 제안가격의 적정성 여부를 판단하는 기초 자료로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 가격정보 획득이 불가능한 해외무기체계의 단가를 추정할 수 있는 방법론을 제시하였지만, 수집한 단가 데이터를 IHS Jane's에 의존한다는 한계가 있다. 그러므로 실제 무기체계 도입가격에 영향을 미치는 정치적 관계, 군사적 긴장도, 구매 수량, 생산라인의 가동/폐쇄여부, 지불조건, 납지 등의 요인을 고려하지 못한다. 또한 데이터 수집의 한계로 인해 실제로

운용되는 다양한 종류의 탐색기 종류를 반영하지 못하였으며, 따라서 지속적인 추가 데이터 수집을 통한 모형의 갱신이 요구된다.

또한 본 연구를 통해 제시된 모형에서는 AGM-114 Hellfire 계열과 같이 형상과 사거리, 탄두중량 등의 제원은 유사하나 수십 년에 걸친 지속적인 성능개량 및 신규 플랫폼과의 체계통합을 위해 다양한 파생형이 개발된 경우를 반영하는데 한계가 있다. 이는 파생형별 성능 차이를 반영할 수 있는 설명변수의 선정 및 추가, 그리고 통계적 유의미성을 갖는 충분한 표본의 확보를 통해 해결 가능하나 데이터 수집의 제한 사항을 고려할 때, 모형 차수의 상향조정 또는 비선형 모델링을 이용한 후속 연구가 필요한 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 다음과 같은 부분에 대한 연구를 진행하여 본 연구의 활용성을 높이는 한편, 한계를 극복할 수 있을 것으로 전망된다.

첫째, 본 연구에서 제시하고 있는 모형을 통해 확보할 수 있는 추정치는 과거의 데이터를 활용하여 도출되는 점 추정치이다. 따라서 사업예산, 일정, 기술 요소, 납지 등의 불확실성 요소를 고려한 확률적 구간 추정치 제시를 위한 추가 연구가 필요하다.

둘째, 본 연구의 범위는 해외 무기체계의 도입 단가만을 다루고 있다. 무기체계의 획득비용은 총수명주기(Total Life Cycle)에 대한 고려가 필수적이므로, 운영 유지비용을 고려한 추정 모형 개발을 통해 무기체계의 전체 수명주기 관점에서의 합리적 예산 집행이 가능하도록 하는 연구가 필요하다. 또한 후속연구에서는 장기간에 걸쳐 획득이 이루어지는 무기체계 도입사업의 특성을 반영하여 국가별/산업분야별 물가지수를 이용하여 총 사업기간 동안의 물가상승률 보정이 고려되어야 할 것이다.

셋째, 2018년 7월 발표된 우리 군의 국방개혁 2.0은 “첨단 ICT 기반의 스마트한 군사력 운용 능력 보장”을 강조하는 등 국방 분야에서도 4차 산업혁명이 대두되고 있다. 따라서 향후 연구에서는 제조 패러다임 변화 등 4차 산업혁명의 주요 이슈를 반영할 수 있는 모형에 대한 연구가 필요하다.

후 기

이 성과는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재

원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(No. 2019R1A2C1090655).

References

- [1] Defense Acquisition Program Administration, "Defense Acquisition Program Statistical Yearbook," Seoul: DAPA, 2020.
- [2] PIETER D. WEZEMAN, et al., "TRENDS IN INTERNATIONAL ARMS TRANSFERS, 2019," SIPRI Fact Sheet, 2020.
- [3] H. Lee, K. Ha, S. Kwak, "Theory and Practice of Cost Analysis," Korea Institute for Defense Analyses, 2018.
- [4] W. Eo, Y. Lee and S. Kang, "Developing an R&D CER Using Historical Defense Weapon System Data in Korea," Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering, Vol. 33, No. 3, pp. 55-62, 2010.
- [5] H. Lee, "The Right Understanding of Cost Analysis and Direction of Development," Defense Industry Policy Forum, 2002.
- [6] J. Lee, et al., "Estimation of the RDT&E Cost of a Weapon System Using a Prior Elicitation Method (2nd step)," Agency for Defense Development, 2008.
- [7] T. Sung, "Understanding and Application of Modern Basic Statistics," Hakjisa, 2017.
- [8] S. Gwon, "Regression Analysis-based on Utilizing Statistical Software SAS·SPSS," Freedom Academy, 2010.
- [9] Y. Lee, et al., "Development of R&D Cost Estimation Model for Missile System," Journal of the Korean Association of Defense Industry Studies, Vol. 19, No. 1, pp. 74-99, 2012.
- [10] A. E. Hoerl, R. W. Kennard, "Ridge Regression: Biased Estimation for Nonorthogonal Problems," Technometrics, Vol. 12, pp. 69-82, 1970.
- [11] G. Khalaf, G. Shukur, "Choosing Ridge Parameter for Regression Problems," Communications in Statistics - Theory and Methods, Vol. 34, No. 6, pp. 1177-1182, 2005.
- [12] H. Kim, et al., "Korean Cost Analysis Computer Model User Education," Defense Acquisition Program Administration, 2017.
- [13] J. Won, "A Study on Estimation Method for Reasonable Price using PRICE Model," Defense Agency for Technology and Quality, 2010.