한국군사과학기술학회지 제14권 제3호, pp. 441~457, 2011년 6월

학술논문 체계공학 부문

공리적설계/AHP를 이용한 해외무기체계 구매사업 제안서 평가지표 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Proposal Evaluation Index for the Overseas Weapon System Purchasing Projects using Axiomatic Design/AHP

조 현 기* 김 우 제*
Hyunki Cho Woo-Je Kim

Abstract

In this study, the axiomatic design(AD) method is applied to construct the hierarchical structure of evaluation criteria and the AHP method is used to calculate the weights of criteria in order to develop the proposal evaluation index for the overseas weapon system purchasing projects. The common evaluation items as main categories are selected through the review of evaluation criteria from the previous works and projects, relevant regulations and defense policy, and the design matrix using fuzzy concept is established and evaluated by the expert group in each design phase to determine the independency, that is the satisfaction of decoupled or uncoupled design, for each criteria in the same hierarchy when they are derived from the main categories. The establishment of decoupled or uncoupled design matrix provides mutually exclusiveness of how small number of DPs can be accounted for FRs within the same hierarchy. The proposal evaluation index developed in this study will be used as a general proposal evaluation index for the overseas weapon system purchasing projects which there are no systematically established evaluation tools.

Keywords : AHP, Axiomatic Design, Co-decision Matrix, Functional Requirement, Design Parameter, MECE

1. 연구배경

국방분야 무기체계 도입 방법에는 우리가 보유하지 못한 기술을 국내단독 또는 외국과 협력하여 공동으로 연구하고, 연구된 기술을 실용화하여 필요한 무기체계를 생산·획득하는 연구개발과, 도입 시기를 기준으로 국내 또는 외국에서 개발 및 생산된 무기체계를 완제품 형태로 획득하는 구매에 의한 방법이 있다. 이 중 무기체계를 해외로부터 구매하는 사업은 요구조건을 충족하는 국내 생산품이 없거나 국내구매가 곤란할 경우 해외에서 생산된 군수품을 구매하는 것으로, 업무 절차는 무기체계 소요결정이 이루어지면 획득방법이 포함된 사업추진전략 수립과, 제안요청서 배부,

† 2011년 3월 2일 접수~2011년 5월 13일 게재승인
* 서울과학기술대학교(Seoul National Unversity of Science and Technology) 산업정보시스템공학과
책임저자 : 김우제(wjkim@seoultech.ac.kr)

제안서 접수, 제안서 평가 및 대상장비 선정, 협상과 시험평가, 입찰, 기종결정, 계약, 장비제작, 납품의 순으로 진행된다[1].

일반적으로 국내 연구개발사업의 제안서 평가는 최우선 협상대상업체를 선정하는 것이 주목적이지만, 해외무기체계 구매사업의 제안서 평가는 기종을 확정하거나 업체를 선정하는 것이 아니라 협상과 시험평가를 받을 수 있는 자격이 되는 장비를 선정하는 단계이다. 따라서 현 제도와 규정에 의하면 대부분의 해외무기체계 구매사업의 제안서 평가는 제안요청서에 명시된 성능, 표준계약조건 등 입찰에 참여하기 위해 필히 충족되어야 하는 필수조건의 충족여부와 필수조건을 제외한 선택조건 항목 중 70% 이상의 항목에 대해 제안업체가 수락했는지 여부만 확인하는 방법으로 수행하고 있어 정형화된 평가지표를 적용하기 보다는 주로 사업의 특성과 여건에 맞춰 규정과 지침에 명시된 분야와 방법을 기준으로 제안서평가를 실시하고 있다. 평가내용 측면에서는 요구항목 대비 제안업체의 응답여부를 확인하는 방법으로 실시되기 때문에 각 항목별 중요도나 충실성, 신뢰성 등의 정성적 평가항목의 반영은 적용에 한계가 있어 기존의 평가지표에 대한 개선이 시급한 실정이다.

본 연구에서는 필수조건과 선택조건의 응답여부를 확인하는 제안서 평가에서 사용자의 요구조건을 충족하고 무기체계 배치 이후 장비의 안정적인 운용유지가 가능하도록 후속군수지원과 이를 수행하는 해외제안업체의 계약 이행 능력 확인이 가능하도록 협상력 제고와 합리적 의사결정지원이라는 관점에서 평가할 수 있는 평가지표의 항목 설계와 가중치 배점 도출에 중점을 두었다.

이를 위해서 우선 기존의 해외 문헌연구, 국방 구매사업의 제안서평가항목 검토, 관련규정 등에 대한 분석을 통하여 평가항목의 일반화된 평가영역을 정의하여 전체적으로는 집합적인 완결성(CE : Collectively Exhausted)에 대한 충족이 될 수 있도록 하였으며, 체계적인 평가지표 설계를 위해 공리적설계(Axiomatic Design)[11]를 적용함으로써 제안서평가항목이 독립성을 유지하도록 하여 상호배타성(ME : Mutually Exclusive)을 가지도록 하였다. 평가항목의 독립성을 평가하기 위해 계층구조별 각각의 설계단계에서는 전문가로부터 해당 계층구조 평가항목의 독립성에 대한 계량화된 평가를 하도록 하였으며, 전문가 평가간 설계에 대한 충분하지 않은 정보와 불확실성에 대한 부분 해소를 위해 퍼지 개념을 적용하였다. 평가항목에 대한 가중치는 전문가 의견이 체계적으로 반영된 계층분석기법(AHP : Analytic Hierarchy Process)[12]을 적용하여 평가지표 개발이 보다 객관성을 이루도록 하였다.

AHP에 공리적 설계를 이용한 사례는 김찬수가 국방핵심기술 연구개발의 제안서 평가를 위한 평가지표 개발[3]에서 최초로 적용하였으나, 아직은 개념적 정립과 정성적 방법에 의한 적용 수준에 머무르고 있다. 김찬수는 공리적 설계의 각각의 수준에서 구축된 설계행렬의 독립성을 설계자의 정성적 판단에 의한 평가를 통하여 확인하였으며, 전체 설계행렬의 비연성화를 통하여 MECE를 입증하였다. 하지만 이는 설계자의 직관에 의존한 평가로 자의적 판단이 포함될 가능성을 내포하고 있기 때문에 독립성 평가 결과에 대한 객관성의 결여라는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해서는 설계행렬에 대한 평가를 계량화하여 평가할 필요가 있다.

공리적 설계에서의 설계행렬 계량화 평가 방법은 일반적으로 Reangularityu(R)와 Semangularity(S)를 적용하는데, R은 기능적 영역에 있는 두 설계변수(DPs : Design Parameters)간의 모든 각도에 대한 sin 값을 내적하여 절대값을 취한 것을 의미하며, S는 설계행렬내 각각의 설계변수와 기능적 요구사항(FR : Functional Requirement) 변수쌍들 사이의 관계를 나타내어, 대각행렬이 되면 R=S가 된다[5]. 그러나 FR과 DP의 수가 커지면 R과 S를 계산하는 절차는 매우 복잡해지고 R과 S가 기능적 독립성의 정도를 나타내지 못하기 때문에 이를 보다 쉽게 계산하는 방법이 필요하다.

Cebi는 설계행렬의 계량적 평가를 위해 전문가 그룹에 의한 정성적 판단 결과를 퍼지개념에 의한 언어적 척도를 정량화하여 평가기준의 충족여부를 확인하였다[6]. 각각의 요구사항에 대응하는 설계변수의 영향정도를 상위수준으로부터 최하위수준(Leaf Nodes)까지 확인함으로써 설계행렬 전체적으로 연성 정도를 확인할 수 있도록 하였다. 하지만 설계행렬의 크기가 크면 클수록 연성 정도를 나타내는 수치는 상대적으로 작아지기 때문에 비연성 충족기준을 쉽게 만족할 수 있는 문제점이 제기되었고, 전체행렬에서 비연성 충족기준을 만족하여도 일부 하위수준의 설계행렬 또는 특정 FRi는 충족되지 않을 수 있기 때문에 이에 대한 보다 구체적인 충족기준 설정이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 공리적 설계에 적용된 계량화된 설계행렬 평가 기법을 AHP에 적용하여 계층분해에 응용하고자 하며, 기존의 설계행렬에 대한 계량

화 평가 기법의 문제점을 보완할 수 있는 새로운 평가방법을 제시하고자 한다. 또한, 개발된 평가지표의 평가항목과 기존의 평가체계를 비교분석하고 평가항목에 대한 평가방법 제시를 통하여 평가지표의 실제 적용 가능성과 실효성을 분석하였다.

2. 평가항목 고찰 및 이론적 배경

가. 제안서 평가항목 고찰

기존의 국방분야 해외무기체계 구매사업의 제안서 평가는 대상장비를 선정하는 단계이기 때문에 각각의 평가항목에 대한 배점이 없다. 따라서 본 연구에서는 구매사업의 성격과 유사한 공급업체 선정 평가항목 분석을 통하여 각 사업별로 적용된 평가항목을 분석하였으며, 국내의 경우는 그동안 국방분야에서 실시한 구매사업 사례 분석을 통한 제안서 평가항목의 공통분야와 관련규정에 명시된 평가항목을 분석하여 전체적으로 구매사업에 적용할 수 있는 평가영역의 적용성과 공통성을 도출하였다.

Table 1은 2000년 이후 총 78건의 해외문헌조사를 통하여 다기준 의사결정(MCDM : Multi-Criteria Decision Making)에 의한 공급업체 선정 연구방법에서 가장 많이 적용한 평가항목을 제시하였는데 주로 품질, 일정, 가격/비용, 제작능력, 서비스, 관리, 기술, 연구개발, 재무, 융통성 순으로 많이 적용한 것을 확인할 수 있었다. 품질은 총 68건의 문헌에서 적용하였는데 세부분야를 살펴보면 수용성이나 적합성, 고장배제와 예방정비, 결함률, 6 시그마 등에 대한 평가요소가 포함되어 기본적인 장비의 제원은 물론 성능유지 관점에서의 평가항목을 주로 적용하였다. 일정 항목의 경우 64건의 문헌에서 주로 인도일정의 적절성이나 인도일정 준수율 관점에서 평가항목으로 적용하였으며, 가격/비용은 총 63건의 문헌에서 장비 공급과 관련된 제비용 요소에 대한 평가로써 고려하였지만, 단일 기준으로 적용할 경우에는 현대의 공급업체 선정방법으로는 적절치 못한 것으로 제시하였다[9].

Table 1. 공급업체 선정 평가항목[9]

평가항목	대상문헌	품질	일정	가격비용	제작능력	서비스	관리	기술	연구개발	재무	융통성	기타 1)
건수	78	68	64	63	39	35	25	25	24	23	18	24

1) 명성, 관계, 위험, 안전, 환경 등

국내의 해외무기체계 구매사업 사례는 방위사업청이 개청한 2006년 이후의 사업을 대상으로 제안서 평가항목의 공통분야를 검토하였는데, 대부분은 규정에 명시된 기준과 해당 사업의 추진전략에 의거 평가항목을 적용하였다. 평가항목은 주로 장비 자체에 대한 성능 및 품질과 연계한 군수지원성, 일정, 기술이전, 비용 등이 적용되었으며, 사업관리나 자료 신뢰성, 판매실적, 기업 재무, 신용등급, 정책적 고려사항 등의 기타요소는 각각의 사업 특성과 추진전략에 따라 상이하게 적용되었다.

Table 2. 방위사업청 해외구매사업 제안서 평가항목 적용 사례(2006년~2010년)

구 분	성능	운용 적합성	ILS	일정	기술 이전	비용	사업 관리	자료 신뢰성	기타[1]
조기경보통제기	○	○	○	○	○	○	○	○	○
F-15급 전투기 2차	○	○	○	○	○	○	○	○	○
대포병탐지레이더	○	○	○	○	○	○	○	○	○
심해잠수구조정	○	○	○	○	○	○	○		
전자전훈련장비	○	○	○	○	○	○	○		○
대형수송기	○	○	○	○	○	○	○		
대함유도탄방어무기	○	○	○	○	○	○	○		
비 고	필수[2]	필수 선택[3]	필수 선택	필수	필수	필수	선택	-	필수 선택

1) 판매실적, 재무구조, 신용등급, 정책적 고려사항 등
2) 요구사항에 대해 필히 수락하거나 충족해야 하는 조건
3) 요구한 항목의 70% 이상을 충족하여야 하는 조건

방위사업관리규정에서 명시하고 있는 해외무기체계 구매사업에 대한 제안서 평가항목도 요구 성능의 만족도와 종합군수지원요소, 상호운용성 확보 등과 관련된 성능요소와 가격 및 계약조건, 기술이전 조건이 포함된 절충교역, 기타 제안서의 신뢰성과 자료의 충분성 등을 명시하고 있어, 기본적으로는 각각의 사업 사례에서 적용하였던 평가항목과 유사한 것을 알 수 있었다. 해외구매사업에 적용된 평가항목에 대한 요약결과는 Table 2에 제시하였다.

Fig. 1은 해외문헌 검토 결과와 국내 국방분야 해외무기체계 구매사업 사례, 관련규정 검토 등을 기초로 각 항목에 대한 종합적인 관계를 제시한 것으로, 제안서 평가항목으로 적용하기 위해서는 공통 평가기준으로 품질과 비용, 계약이행관리, 기술이전/절충교역 영역으로 분류하였다.

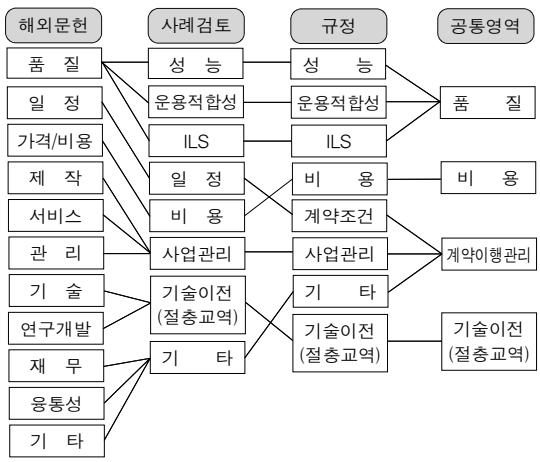

Fig. 1. 제안서 평가항목 공통영역 도출

나. 공리적 설계 개요

공리적 설계는 공학도에게 과학적이고 체계적인 설계 프로세스 구축 방법을 제시하는 설계공학으로, 공리적 설계의 주(主) 목적은 보다 창의적이고 임의의 조사 프로세스를 줄이고, 반복적인 시행착오를 최소화하며 제안된 설계 중에서 최선의 대안을 결정할 수 있도록 하는데 있다[3].

설계를 개선하기 위해 공리적설계에서는 2가지의 공리를 충족하여야 한다. 2가지 공리는 다음과 같다[11].

- 공리1 : 독립공리(Independence Axiom)
  - 최상의 설계는 FRs이 독립성을 유지하는 경우이며,
  - 수용 가능한 설계는 DPs가 다른 FRs에 영향을 주지 않는 수준에서 대응하는 FR을 충족하도록 조정 가능한 범위에서 연결이 될 경우이다.

- 공리2 : 정보공리(Information Axiom)
  - 최상의 설계는 최소의 정보량을 가지고 기능적으로 비연성 또는 비연성화 설계인 경우이다.

FR과 DP간의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$\{FR\}=[A]\{DP\},\ \ A=[A_{ij}]_{m\times n} \tag{1}$$

$$A=\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

식 (1)에서 $\{FR\}$은 기능적 요구사항 벡터로 설계의 요구사항을 만족시키기 위한 요구사항을 기술하는 최소 개의 독립적인 요소이며, $\{DP\}$는 설계변수 벡터로 기능적 요구사항을 충족하기 위한 물리적 영역의 요소이다. $[A]$는 $\{FR\}$과 $\{DP\}$의 관계를 정의하는 설계행렬(Design Matrix)로서 형태는 비연성(Uncoupled) 설계, 비연성화(Decoupled) 설계, 연성(Coupled) 설계로 구분할 수 있다. 식 (2)의 설계행렬이 대각행렬이 되면 비연성 설계가 되고, 식 (2)의 설계행렬이 삼각행렬이 되면 비연성화 설계가 된다. 비연성화 설계가 되기 위해서는 설계행렬의 FR과 DP의 재배치가 필수적으로 진행되어야 한다. 기능적 요구사항에 대해 다수의 설계변수에 의해 영향을 받는다면 설계변수의 변경에 따른 기능적요구사항의 효과적인 해결방법이 없기 때문에 바람직하지 않은 설계이다. 따라서 독립공리와 정보공리를 만족시킬 수 있는 설계방법은 비연성 또는 비연성화 설계이다.

공리적 설계에서 정보량(Information Content, I)은 정의된 기능적 요구사항을 달성할 수 있는 성공 확률로 기능적 요구사항을 위한 설계범위(Design Range)와 시스템 범위(System Range)간 겹치는 공통영역을 결정함으로써 계산될 수 있다.

Fig. 2에서 A_{CR}는 설계범위와 시스템범위가 서로 겹치는 공통범위(Common Range)이며, 요구 설계를 달성하기 위한 설계 성공확률과 동일하기 때문에 아래와 같이 나타낼 수 있다.

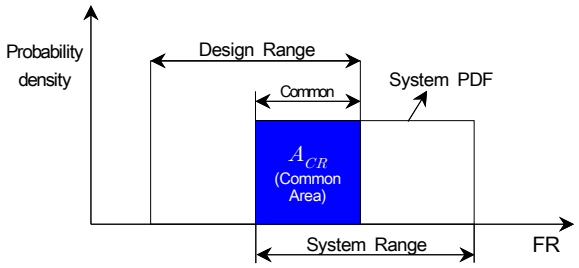

Fig. 2. 설계범위, 시스템범위, 공통범위, 확률밀도함수[10]

$$A_{CR} = \frac{\text{공통범위}}{\text{시스템범위}} = P \tag{3}$$

정보공리 충족을 위한 정보량은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$I = \log_2 \frac{1}{A_{CR}} = \log_2 \frac{1}{P} \tag{4}$$

만약 식 (4)에서 모든 FRs에 대해 성공확률이 0이면 정보량은 무한대가 되며 바람직하지 않은 설계가 되지만, 1이 되면 정보량은 0이 되어 기능적 요구사항을 충족하는 설계가 된다. 본 연구와 같이 제안서 평가를 위한 평가지표 개발에 있어서 정보량 계산은 현실적으로 제한이 되기 때문에 FRs과 DPs의 관계를 나타내는 설계행렬에 대해 전문가에 의한 정성적 평가를 통하여 비연성 설계나 비연성화 설계가 된다면 독립공리와 정보공리를 충족하게 되어 설계 목표가 달성될 수 있다. 설계행렬에 대한 세부적인 평가방법은 3장에서 제시하였다.

3. 제안서 평가지표 개발

가. 평가지표 개발을 위한 프레임 워크

평가지표 개발을 위해서는 Table 2에서 명시한 필수조건에 대한 자격조건 구비여부를 선별하는 절차가 필요하다. 즉, 무기체계에 대한 요구성능이나 장비 인도시기, 절충교역 비율 충족, 방위사업청에서 요구하는 표준계약조건 등의 필수조건들은 제안서 평가 절차에서 평가의 대상이 아니라 제안업체가 필히 수락하거나 충족해야하는 조건들이며, 협상의 여지가 없는 항목이기 때문에 본 연구에서는 제안서 평가지표 개발 이전 예비자격조건 단계(Pre-qualification Phase)로 처리하고 나머지 항목에 대해 평가지표 개발에 포함시키는 것으로 하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 적용한 제안서 평가지표 개발 프레임 워크를 제시하고 있다. 먼저 제안서 평가항목의 공통영역 분류 결과에 대해 공리적 설계를 이용하여 AHP 기법 적용에 필요한 계층구조를 설계하였다. 공리적 설계에서는 각 계층별 FRs과 DPs를 설정하였다. FRs에 대응하는 DPs의 독립성 평가는 설계행렬을 구축하여 다수의 전문가에 의한 평가로 실시하였으며, 각각의 FR에 대한 DP의 독립공리 충족여부를 확인하였다. 만약 독립공리가 충족되지 않을 경우는 FRs과 DPs에 대한 재선정, 재설계, 추가분해 등의 방법을 통해 각 계층내에서의 배타적 독립성이 충족되도록 반복적인 수행을 실시하였다. 각 계층의 DPs는 FRs을 구현하기 위한 수단이 되기 때문에 제안서 평가항목으로 대응시켰다. 공리적 설계를 통하여 계층구조 설계가 완료되면 계층별 평가항목에 대한 가중치 부여를 위해 AHP 기법을 적용하였으며, 평가항목에 대한 가중치 산출 결과를 이용하여 각각의 평가항목에 대한 배점 비율을 부여한 제안서 평가지표를 최종적으로 개발하였다.

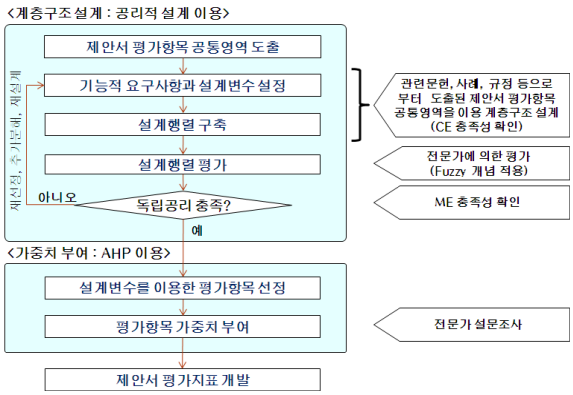

Fig. 3. 제안서 평가지표 개발 프레임 워크

나. 설계행렬 평가방법

설계행렬은 FRs과 DPs의 관계를 나타내는 행렬로서, FRs과 DPs가 직접적으로 관계가 있을 경우에는 1로 표현하고 관계가 없을 경우에는 0으로 표현하여 설계행렬 형태가 대각행렬이나 삼각행렬이 되면 독립공리를 충족하게 되지만, 그렇지 않은 경우에는 연성설계가 되어 독립공리를 충족하지 못하게 된다. 하지만 제안서 평가와 같이 FRs과 DPs간의 관계를 정확히

알 수 없는 경우에는 별도의 방법을 적용한 평가가 필요하게 되는데 이를 위해 본 연구에서는 퍼지 환경하에서의 언어적 척도(Linguistic Scale)에 의한 평가를 적용하였다.

퍼지 환경하에서의 언어적 척도는 일상적인 생활에서 사용되는 인간의 인지적 판단 체계를 설명하는 것으로, 기능적 요구사항과 설계변수의 관계를 정확히 정의할 수 없기 때문에 본 연구에서는 0 또는 1을 사용하는 대신 Fig. 4와 같이 0과 1 사이의 언어적 척도를 사용하여 설계행렬을 평가하였다.

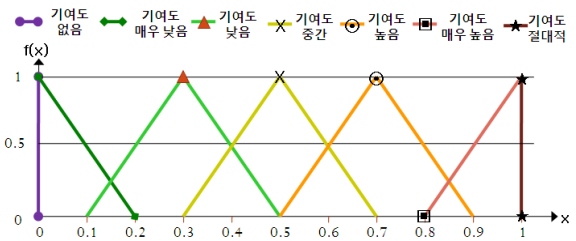

Fig. 4. 언어적 척도

설계행렬 평가를 위해 각 하위수준별 행렬은 식 (5)와 같이 재구성하여 전문가 그룹에 의해 식 (6)과 같이 나타낼 수 있는데,

$$\begin{array}{cc|ccccccc} & & DP_1 & & DP_2 & & DP_3 & \cdots & DP_r \\ & & DP_{11} & DP_{12} & DP_{21} & DP_{22} & & & \\ \hline FR_1 & FR_{11} & \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \tilde{a}_{13} & \tilde{a}_{14} & \tilde{a}_{15} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ & FR_{12} & \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \tilde{a}_{23} & \tilde{a}_{24} & \tilde{a}_{25} & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ FR_2 & FR_{21} & \tilde{a}_{31} & \tilde{a}_{32} & \tilde{a}_{33} & \tilde{a}_{34} & \tilde{a}_{35} & \cdots & \tilde{a}_{3n} \\ & FR_{22} & \tilde{a}_{41} & \tilde{a}_{42} & \tilde{a}_{43} & \tilde{a}_{44} & \tilde{a}_{45} & \cdots & \tilde{a}_{4n} \\ FR_3 & & \tilde{a}_{51} & \tilde{a}_{52} & \tilde{a}_{53} & \tilde{a}_{54} & \tilde{a}_{55} & \cdots & \tilde{a}_{5n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ FR_r & & \tilde{a}_{m1} & \tilde{a}_{m2} & \tilde{a}_{m3} & \tilde{a}_{m4} & \tilde{a}_{m5} & \cdots & \tilde{a}_{mn} \end{array} \quad (5)$$

$$\Downarrow$$

$$A^k = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{a}_{m1} & \tilde{a}_{m2} & \cdots & \tilde{a}_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

m과 n은 FRs과 DPs의 수, k는 전문가 수, A^k는 k번째 전문가에 의해 평가한 퍼지 설계행렬, $\tilde{a}_{ij}$는 설계행렬의 i번째 행과 j번째 열의 퍼지수을 의미한다.

k명의 전문가 그룹에 의한 설계행렬 평가 결과는 산술평균을 이용하여 종합하였으며, 종합된 설계행렬을 퍼지공동의사결정행렬(Fuzzy Co-decision Matrix, $[A_C]$)[8]로 정의하여 다음과 같이 표현하였다.

$$\{FR_i\} = [A_C]\{DP_i\} \quad (7)$$

$where$

$$[A_C] = \frac{1}{k}(A^1 \oplus A^2 \oplus \cdots \oplus A^k)$$

$\oplus$: 퍼지 산술연산자

전문가 그룹에 의한 설계행렬 평가와 설계행렬에 대한 산술평균을 구하게 되면 이를 다시 비퍼지화수(Defuzzification Number)로 전환하여야 하는데, 이를 위해 본 연구에서는 식 (8)과 같이 최대평균법을 적용하였으며, 비퍼지화 공동의사결정행렬(Defuzzified Co-decision Matrix, $[A_C^{\text{def}}]$)은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$a_{ij}^{\text{def}} = \frac{a_{ij}^l + 2a_{ij}^m + a_{ij}^u}{4}, \; i = 1,\cdots,m \text{ and } j = 1,\cdots,n \quad (8)$$

$$[A_C^{\text{def}}] = \begin{bmatrix} a_{11}^{\text{def}} & a_{12}^{\text{def}} & \cdots & a_{1n}^{\text{def}} \\ a_{21}^{\text{def}} & a_{22}^{\text{def}} & \cdots & a_{2n}^{\text{def}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1}^{\text{def}} & a_{m2}^{\text{def}} & \cdots & a_{mn}^{\text{def}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (9)를 이용하여 FRs의 순서와 DPs의 순서를 변경함으로써 가능한 비연성화 설계가 되도록 구축하여야 한다.

$$S_{FRi} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}^{\text{def}} \quad (10)$$

$$S_{DPj} = \sum_{i=1}^{m} a_{ij}^{\text{def}} \quad (11)$$

S_{FRi}는 FRi에 대한 순서 값이며, S_{DPj}는 DPj에 대한 순서 값이다. 비교 대상 하위수준 FRs 그룹내에서는 S_{FRi} 값이 가장 작은 것에 해당하는 FR이 맨 위 행으로 오고, 만약 S_{FRi} 값이 동일 할 경우에는 S_{DPj} 값이 가장 크게 나오는 FR이 위에 오도록 한다. 그러나 S_{FRi} 값과 S_{DPj} 값이 동일할 경우에는 설계자 편의에 따라 FR의 순서를 정하면 되겠다. 비교 대상 하

위수준 DPs는 대응하는 동일 하위수준의 FRs 순서에 따라 열의 위치를 정해야 한다[8].

설계행렬의 FRs과 DPs간의 관계에 대한 순서가 확정되면 FRs의 독립성에 대한 평가를 실시하여야 한다. 평가방법은 식 (12)에 의한 비연성화 값(C_R)에 의해 평가할 수 있다[8].

$$C_R = average\left(\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=i+1}^{n} a_{ij}^{\mathrm{def}}\right) \tag{12}$$

만약 C_R = 1이거나 $C_R > \gamma$이면 연성 설계가 되고 C_R = 0이거나 $C_R \le \gamma$이면 비연성 설계 또는 비연성화 설계로 평가할 수 있는데, γ는 설계행렬 평가에 참여한 전문가에 의해 정의된 [0, 1] 사이의 수치이다[8]. 하지만, 설계행렬이 커지면 커질수록 $C_R \le \gamma$를 충족할 수 있는 가능성이 크기 때문에 본 연구에서는 C_R에 대한 기준 충족 확인을 위해 t-검정을 적용하였다.

$$\begin{cases} H_0 : C_R = \mu_0 \\ H_1 : C_R \neq \mu_0 \end{cases} \quad (\text{유의수준 } \alpha = 0.05) \tag{13}$$

$$\text{검정통계량}(T.S.) = \frac{C_R - \mu_0}{s/\sqrt{n}} \tag{14}$$

where

μ_0: 비연성 설계시 대각선 우상단 요소의 평균($\mu_0 = 0$)

s: 설계행렬의 대각선 우상단 요소의 표준편차

n: 설계행렬의 대각선 우상단 요소의 갯수

식 (13)과 같이 만약 C_R = 0이란 가설에 대해 식 (14)에 의한 검정통계량이 t-검정통계량보다 클 경우 기각역에 포함되어 귀무가설은 기각이 되므로 FRs의 재설계나 추가 분해 등의 설계를 하여야 한다. 그러나 검정통계량이 t-검정통계량 보다 작아서 기각역에 포함되지 않을 경우는 C_R = 0으로 가정할 수 있기 때문에 설계행렬은 비연성화 또는 비연성 설계가 되었다고 할 수 있다.

설계행렬 전체는 비연성화 수준이 충족되어도 대각선이 아닌 곳에서의 특정 DP값이 상대적으로 우월성을 가져 연성설계가 될 수 있기 때문에 각각의 FRi에 대한 비연성화 정도는 추가적으로 확인해야 한다. 본 연구에서는 이상적인 설계는 대각선상에서는 1이, 그렇지 않은 곳에서는 0인 비연성 설계이지만, 식 (15)의 비연성화 설계가 일반적으로 나타날 수 있는 상황이다.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ \vdots \\ FR_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ X & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X & X & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ \vdots \\ DP_n \end{Bmatrix} \tag{15}$$

각각의 FRi에 대한 비연성화 정도를 확인하기 위해서는 설계행렬의 대각선을 기준으로 우측의 요소에 대해 식 (16)과 같이 계산할 수 있다.

$$FR_i = [X\,X\,1\overbrace{0\,0\,0\cdots 0}^{A_i^P}]\{DP\} \tag{16}$$

where

$$\{DP\} = \{DP_1\, DP_2 \cdots DP_n\}^T$$

재정의된 내적 A_i^P은 식 (17)을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\| A_i^P \| = \left(\sum_{j=i+1}^{n} a_{ij}^2 \right)^{1/2} \tag{17}$$

식 (17)에 따라 $\| A_i^P \| = 0$ 또는 $\| A_i^P \| \approx 0$이 되면 FRi에 대한 설계는 수용 가능하다고 할 수 있다. FRi에 대한 설계 충족여부를 확인하기 위해서는 기준값을 선정해야 한다. 만약 $\| A_i^P \|$가 기준값보다 크면 추가나 삭제, 분해 등의 재설계를 실시해야 한다. 기준값 설정에 대한 별도의 규칙은 없으나 벡터 내적이 0.1이내에 있을 경우 대각선의 1에 비교하여 타당한 기준으로 선정하였다. 설계행렬 독립성 평가기준은 Table 3에 제시하였다.

Table 3. 설계행렬 평가기준

구 분	평가기준
전체 설계행렬 비연성화 평가	$H_0 : C_R = 0$ $H_1 : C_R \neq 0$ (유의수준 $\alpha = 0.05$) $\frac{C_R - (\mu_0 = 0)}{s/\sqrt{n}} (= T.S.) \le (t - \text{검정통계량})$
하위수준 설계행렬 비연성화 평가	$\| A_i^P \| \le 0.1$

설계행렬 평가를 위해 사업관리와 종합군수지원, 계약관리, 기술관리분야의 전문가를 선발하여 인터뷰 형식의 설문을 실시하도록 하였다. 선발된 전문가는 Table 4와 같다.

Table 4. 분야별 전문가 현황

구분	계	사업관리	ILS	계약관리	기술관리
인원(명)	7	2	2	2	1

다. 제안서 평가항목에 대한 공리적 설계

1) 최상위 수준 설정

일반적으로 사업은 비용과 일정, 성능의 절충적 관점에서 관리되어야 한다. 즉, 성능을 높일 경우 비용이 추가될 수 있고 일정이 지연될 수 있다. 일정을 단축하기 위해서는 인력과 다른 요소의 투입이 상대적으로 높아야 하기 때문에 비용에 영향을 줄 수 있다. 따라서 비용과 일정, 성능간의 절충은 사업의 성공을 위해서는 항상 필요한 사항이며, 이는 국내 연구개발사업이나 해외무기체계 구매사업 모두에 고려되어야 할 사항이다. 이러한 개념에 따라 최상위 수준 FR은 본 연구의 목적과 연계될 수 있고 DP는 상응하는 FR의 요구사항을 충족하기 위해 정의되어야 한다. 결과는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- FR : 합리적인 비용과 최소의 군수지원으로 신뢰성이 높은 해외무기체계 결정
- DP : 해외무기체계 결정을 위한 제안서 평가지표 개발

2) 첫 번째 하위수준 설정

첫 번째 하위수준 FRs는 제2장에서 평가항목 검토를 통하여 선정한 4개의 공통 영역을 기준으로 설정하였으며, FR에 상응하는 최상의 DPs는 후보 DPs 중에서 선정하였다. 선정된 FRs와 DPs는 Table 5와 같이 나타냈으며, 설계행렬 구축 및 평가 결과는 Table 6과 같이 나왔다.

Table 7은 설계행렬에 대한 비연성화 정도 평가 결과를 나타내었다. Table 3의 기준에 따라 전체 설계행렬은 연성 설계로 하위 수준으로의 추가 분해가 필요하다. 상위수준은 이미 관련 문헌과 사례, 규정 등에 대한 검토를 통하여 선정된 공통영역이기 때문에, 공통영역에 대한 새로운 선정이나 재설계보다는 FRs과 DPs의 추가 분해를 통하여 독립적인 배타성을 가지도록 시도하였다.

Table 5. 첫 번째 하위단계 설계 결과

FR1 사용자 요구사항을 충족하는 성능과 품질을 갖추어야 한다.	장비 성능자료, 시험평가 성적서, 신뢰성 분석 자료, 수리수준보고서, 정비할당표, 수명주기동안의 수리부속 부품의 조달기간 ⇒ DP1 성능 및 운용신뢰성
FR2 장비 획득과 운용유지를 위해 수명주기간 최소의 비용이 투자되어야 한다.	장비 및 기타 요소 구매를 위한 획득비, WBS에 기초한 부품별 단가자료, 수리부품비 ⇒ DP2 수명주기비용
FR3 장비획득을 통하여 관련 핵심기술과 부품제작 기술이 이전되어야 한다.	절충교역 요구 점수 충족, 핵심기술 이전, 부품 제작 기술 이전 및 역수출 ⇒ DP3 절충교역제안
FR4 사용자가 요구하는 시기까지 장비가 인도되어야 한다.	업체의 시설 및 장비 보유수준, 판매실적, 신용평가결과, 제안장비 인증자료, 사업관리계획, 품질보증방안, 수락시험방안 ⇒ DP4 계약이행관리

Table 6. 첫 번째 하위수준 전문가 평가 결과

구분	DP2	DP4	DP1	DP3
FR2	1	0.19	0.65	0.06
FR4	0.16	1	0.64	0.20
FR1	0.48	0.53	1	0.14
FR3	0.20	0.39	0.63	1

Table 7. 첫 번째 하위수준 비연성화 설계 평가 결과

구 분	평가결과
전체 설계행렬 비연성화 평가	C_R = 0.3125, s = 0.26113, n = 6, T.S. = 2.931, t-검정통계량 = 2.571, T.S.>t-검정통계량 ⇒ 미충족

3) 두 번째 하위수준 설정

두 번째 하위수준의 FRij와 DPij는 각각의 FRij간의 독립이 될 수 있도록 첫 번째 하위수준의 FRi와 DPi의 분석을 통하여 설계하였다. FRij와 DPij는 Table 8과 같이 구축하였으며, 설계행렬에 대한 독립성 평가

결과는 Table 9에 제시하였다.

Table 10은 Table 9에 대한 설계행렬 전체의 비연성화 정도를 평가한 결과이다. C_R에 대한 통계량이 t-검정통계량보다 크기 때문에 설계는 기준을 충족하지 못하였으며, 하위수준 설계행렬의 FR11과 FR31, FR33, FR41, FR42의 계산 결과도 기준보다 크게 나왔다. 따라서 FR1에 대한 하위수준은 수정과 추가 분해가, FR3과 FR4는 재설계가 필요 하였다.

Table 8. 두 번째 하위수준 설계 결과

FR1 사용자 요구사항을 충족하는 성능과 품질을 갖추어야 한다. FR11 작전목적 달성에 부합되도록 각종 제원은 요구성능 이상을 충족하여야 한다. FR12 안정적인 임무 수행이 가능하도록 신뢰성을 보장하여야 한다.	DP1 성능 및 운용신뢰성 DP11 장비 제원의 요구성능 충족성 DP12 장비 운용 신뢰성
FR2 장비 획득과 운용유지를 위해 수명주기간 최소의 비용이 투자되어야 한다. FR21 장비 획득비는 가용예산 범위를 초과해서는 안 된다. FR22 장비 운용유지에 소요되는 비용 산정이 타당해야 한다.	DP2 수명주기비용 DP21 가용예산 범위 대비 획득비 비율 DP22 운용유지비 산정의 타당성
FR3 장비 획득을 통하여 관련 핵심기술과 부품 제작 기술이 이전되어야 한다. FR31 국방과학기술진흥 기본계획에 따른 소요기술이 이전되어야 한다. FR32 중장기국산화종합계획에 따른 부품 개발기술과 제안장비에 대한 정비기술이 이전되어야 한다. FR33 부품의 역수출과 국내 방산물자의 수출이 포함되어야 한다.	DP3 절충교역 제안 DP31 핵심기술 이전 수준 DP32 핵심부품 개발 및 정비기술 이전 수준 DP33 군수품에 대한 수출제안 수준
FR4 사용자가 요구하는 시기까지 장비가 인도되어야 한다. FR41 업체는 계약이행에 필요한 재무구조에 대해 외부기관의 평가결과가 제시되어야 한다. FR42 장비 제작과 납품을 위한 사업관리계획은 논리적이고 실행가능하여야 한다. FR43 업체는 계약이행에 필요한 자체 인력과 인프라를 보유하여야 한다.	DP4 계약이행관리 DP41 업체의 신용등급 수준 DP42 사업추진 계획의 타당성 및 위험관리 방안 DP43 장비 제작관련 인력 및 장비, 시설보유 수준

Table 9. 두 번째 하위수준 전문가 평가 결과

구분		DP1		DP2		DP3			DP4		
		DP11	DP12	DP21	DP22	DP33	DP31	DP32	DP41	DP42	DP43
FR1	FR11	1	0.74	0	0	0	0	0	0	0	0
	FR12	0.74	1	0	0	0	0	0	0	0	0
FR2	FR21	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	FR22	0	0	0.01	1	0	0	0	0	0	0
FR3	FR33	0	0	0	0	1	0.38	0.29	0	0	0
	FR31	0	0	0	0	0.24	1	0.74	0	0	0
	FR32	0	0	0	0	0.24	0.74	0.99	0	0	0
FR4	FR41	0	0	0	0	0	0	0	1	0.68	0.37
	FR42	0	0	0	0	0	0	0	0.74	1	0.31
	FR43	0	0	0	0	0	0	0	0.70	0.56	1

Table 10. 두 번째 하위수준 비연성화 평가 결과

구 분	평가결과									
전체 설계행렬 비연성화 평가	C_R = 0.07778, s = 0.19843, n = 45, T.S. = 26.295, t-검정통계량 = 2.015 T.S.>t-검정통계량 ⇒ 미충족									
하위수준 설계행렬 비연성화 평가	$\|A_{11}^P\|$	$\|A_{12}^P\|$	$\|A_{21}^P\|$	$\|A_{22}^P\|$	$\|A_{31}^P\|$	$\|A_{32}^P\|$	$\|A_{33}^P\|$	$\|A_{41}^P\|$	$\|A_{42}^P\|$	$\|A_{43}^P\|$
	0.74	0	0	0	0.74	0	0.47	0.77	0.31	0

Table 11. 두 번째 하위수준 재설계 및 세 번째 하위수준 설계 결과

FR1 사용자 요구사항을 충족하는 성능과 품질을 갖추어야 한다. FR11 장비 제원은 요구성능을 충족하여야 한다. FR111 한국적 작전환경에 적합하고 운용자의 조작이 편리하여야 한다. FR112 타 장비, 체계와의 상호 연동 및 통합운용 소요 자료가 제공되어야 한다. FR12 장비 배치후 후속군수지원 자료가 확보되어야 한다. FR121 장비 정비지원이 용이하여야 하도록 자료가 확보되어야 한다. FR122 초도보급 및 운용유지 물자소요 자료가 확보되어야 한다. FR123 장비 운용유지에 소요되는 시험 및 정비장비 자료가 제공되어야 한다. FR124 장비 운용유지에 소요되는 정비, 보급인력 자료가 제공되어야 한다. FR125 장비 운용에 소요되는 교육훈련 및 교보재, 장비에 대한 자료가 제공되어야 한다. FR13 안정적인 임무 수행이 가능하도록 일정수준 이상의 가동상태가 유지되어야 한다.	DP1 성능 및 운용신뢰성 DP11 장비 성능의 충족성 DP111 군 운용 적합성 및 편의성 DP112 상호운용성 DP12 전력화지원요소의 실용성 DP121 정비계획자료 DP122 보급지원자료 DP123 지원장비자료 DP124 군수인력운용자료 DP125 교육훈련자료 DP13 운용가용도 산출결과
FR2 장비 획득과 운용유지를 위해 수명주기간 최소의 비용이 투자되어야 한다. FR21 장비 운용유지에 소요되는 비용 자료가 제공되어야 한다. FR22 장비 획득비는 가용예산 범위를 초과해서는 안된다.	DP2 수명주기비용 DP21 운용유지비 산정의 타당성 DP22 가용예산 범위 대비 획득비 규모
FR3 제안장비 관련 기술이전과 수출제안이 포함되어야 한다. FR31 절충교역 제안내용은 절충교역지침서의 평가 기준점수 이상이어야 한다. FR32 장비관련 핵심기술과 핵심부품 제작기술 및 창정비기술이 반영되어야 한다. FR33 제안장비에 소요되는 부품의 역수출 또는 기타 군수품에 대한 수출제안이 포함되어야 한다.	DP3 절충교역 제안 DP31 절충교역 요구점수 충족도 DP32 핵심기술 및 부품 제작, 창정비기술 이전 DP33 군수품에 대한 수출제안 수준
FR4 사용자가 요구하는 시기까지 장비가 인도되어야 한다. FR41 업체 재무구조에 대한 외부기관의 평가결과가 제시되어야 한다. FR42 장비에 대한 판매실적 자료와 인증자료가 확보되어야 한다. FR43 장비 제작과 납품을 위한 사업관리계획은 실행가능하고 타당하여야 한다.	DP4 계약이행관리 DP41 업체의 신용평가 등급 수준 DP42 장비관련 판매실적 및 인증자료 DP43 사업관리계획의 타당성 및 위험관리 방안

Table 12. 두 번째 및 세 번째 하위수준 설계 전문가 평가 결과

구분			DP1								DP2		DP3			DP4		
			DP11		DP12					DP13	DP22	DP21	DP33	DP32	DP31	DP41	DP42	DP43
			DP112	DP111	DP125	DP124	DP123	DP122	DP121									
FR1	FR11	FR112	0.99	0.18	0	0	0.11	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		FR111	0.1	1	0.1	0.1	0.11	0.01	0.01	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0
	FR12	FR125	0	0	1	0.04	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		FR124	0	0	0.04	1	0.04	0.04	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		FR123	0	0	0.04	0.04	0.9	0.1	0.18	0.04	0	0.01	0	0	0	0	0	0
		FR122	0	0	0	0.04	0.04	0.96	0.04	0.28	0	0.04	0	0	0	0	0	0
		FR121	0.04	0	0.04	0.1	0.1	0.14	1	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
	FR13		0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.05	0.99	0	0.09	0	0	0	0	0	0
FR2	FR22		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.01	0	0	0	0	0	0
	FR21		0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.04	0	1	0	0	0	0	0	0
FR3	FR33		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.96	0	0	0	0	0
	FR32		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.99	0	0	0	0
	FR31		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.99	0	0	0
FR4	FR41		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.96	0.01	0
	FR42		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.96	0
	FR43		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.99

4) 두 번째 하위수준 재설계 및 세 번째 하위 단계 설정

두 번째 하위수준 중 FR11과 FR12는 추가 분해를 통하여 상호 독립적인 배타성을 가지도록 하였으며, FR3 및 FR4의 경우는 하위수준을 포함하여 요구사항을 재정의함으로써 보다 설계를 구체화하였다. 재설계와 추가 분해 결과는 Table 11과 같으며, 이에 대한 전문가 그룹 평가 결과는 Table 12에 제시되었다.

두 번째 하위수준의 재설계 및 세 번째 하위수준의 설계에 대한 평가 결과는 Table 13에 나타내었다. C_R이 기각역에 포함되어 전체 설계행렬은 연성설계가 된다. 하위수준 설계행렬의 경우에도 FR111과 FR112, FR122~FR124는 0.1보다 크게 나타났는데, 이는 FR12의 부적절한 추가 분해가 주원인으로 판단되었다. FR12의 경우 불필요한 분해의 경우 운용유지를 위한 후속군수지원과 연계된 요구사항이기 때문에 오히려 전체 설계행렬의 다른 DPs와도 연결되어 영향을 주는 것으로 판단되었다. FR13의 경우는 기준값 이내로 충족은 되지만 일정수준 이상의 장비 가동상태 유지를 위해서는 FR12의 종합군수지원 요소와 운영유지비용인 FR21과 상호 밀접하게 연계된 상태에서 달성 가능한 기능적 요구사항이기 때문에 이에 대한 재설계도 필요한 것으로 판단하였다.

Table 13. 두 번째 하위수준 재설계 및 세 번째 하위수준 설계 비연성화 평가 결과

구 분	평가결과							
전체 설계행렬 비연성화 평가	C_R = 0.01554, s = 0.04214, n = 120, T.S. = 4.04, t-검정통계량 = 1.98 T.S.>t-검정통계량 ⇒ 미충족							
하위수준 설계행렬 비연성화 평가	$\|A_{111}^P\|$	$\|A_{112}^P\|$	$\|A_{121}^P\|$	$\|A_{122}^P\|$	$\|A_{123}^P\|$	$\|A_{124}^P\|$	$\|A_{125}^P\|$	$\|A_{13}^P\|$
	0.20	0.21	0.05	0.29	0.21	0.105	0.10	0.09
	$\|A_{21}^P\|$	$\|A_{22}^P\|$	$\|A_{31}^P\|$	$\|A_{32}^P\|$	$\|A_{33}^P\|$	$\|A_{41}^P\|$	$\|A_{42}^P\|$	$\|A_{43}^P\|$
	0.01	0	0	0	0	0.01	0	0

Table 14. 최종 설계 결과

FR1 사용자 요구사항을 충족하는 성능과 품질을 갖추어야 한다. FR11 장비 제원은 작전 목적 달성에 지장이 없어야 한다. FR111 한국적 작전환경에 적합하고 운용자의 조작이 편리하여야 한다. FR112 타 장비, 체계와의 연동 및 통합운용을 위한 방안이 강구되어야 한다. FR113 장비 성능을 이해하고 확증할 수 있는 자료가 확보되어야 한다. FR12 장비는 운용 신뢰성이 확보되어야 한다. FR121 안정적인 임무 수행이 가능하도록 일정수준 이상의 가동상태가 유지되어야 한다. FR122 각종 군수지원자료는 장비 배치후 수명주기간 운용유지하는데 적절하여야 한다.	DP1 품질 DP11 부여된 임무 달성 가능성 DP111 군 운용 적합성 및 편의성 DP112 상호운용성 충족 방안 DP113 성능 사양서 및 인증자료 충실성 DP12 장비의 전투준비태세 유지성 DP121 운용가용도 산출결과 DP122 ILS 자료의 적절성 및 충실성
FR2 구매는 가용예산 범위내에서 이행되어야 한다. FR21 획득비 산정근거가 명확하여야 한다.	DP2 비용 DP21 계약목적물 가격 산정의 적절성
FR3 제안장비 관련 기술이전과 수출제안이 포함되어야 한다. FR31 절충교역 제안내용은 절충교역지침서의 평가 기준점수 이상이어야 한다. FR32 장비관련 핵심기술과 핵심부품 제작기술 및 창정비기술이 반영되어야 한다. FR33 제안장비에 소요되는 부품의 역수출 또는 기타 군수품에 대한 수출제안이 포함되어야 한다.	DP3 절충교역 제안 DP31 절충교역 요구점수 충족도 DP32 핵심기술 및 부품 제작, 창정비기술 이전 DP33 군수품 수출제안 수준
FR4 사용자가 요구하는 시기까지 장비가 인도되어야 한다. FR41 업체 재무구조에 대한 외부기관의 평가결과가 제시되어야 한다. FR42 장비에 대한 판매실적 자료가 확보되어야 한다. FR43 장비 제작과 납품을 위한 사업관리계획은 실행가능하고 타당하여야 한다.	DP4 계약이행관리 DP41 업체의 신용등급 평가 결과 DP42 제안장비 판매실적 DP43 사업관리계획의 타당성 및 위험관리 방안

Table 15. 최종 설계 전문가 평가 결과

구분			DP1					DP2	DP3			DP4		
			DP11			DP12		DP21	DP31	DP32	DP33	DP41	DP42	DP43
			DP113	DP112	DP111	DP122	DP121							
FR1	FR11	FR113	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		FR112	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		FR111	0.16	0.01	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	FR12	FR122	0	0	0	1	0.1	0.04	0	0	0	0	0	0
		FR121	0	0	0	0.19	1	0	0	0	0	0	0	0
FR2	FR21		0	0	0	0	0.14	1	0	0	0	0	0	0.1
FR3	FR31		0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	FR32		0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	FR33		0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
FR4	FR41		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
	FR42		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	FR43		0	0	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	1

Table 16. 최종설계 비연성화 평가 결과

구 분	평가결과											
전체 설계행렬 비연성화 평가	C_R = 0.00368, s = 0.01795, n = 66, T.S. = 1.666, t-검정통계량 = 1.997 T.S.<t-검정통계량 ⇒ 충족											
하위수준 설계행렬 비연성화 평가	$\|A_{111}^P\|$	$\|A_{112}^P\|$	$\|A_{113}^P\|$	$\|A_{121}^P\|$	$\|A_{122}^P\|$	$\|A_{21}^P\|$	$\|A_{31}^P\|$	$\|A_{32}^P\|$	$\|A_{33}^P\|$	$\|A_{41}^P\|$	$\|A_{42}^P\|$	$\|A_{43}^P\|$
	0	0	0	0	0.109	0.1	0	0	0	0	0	0

5) 최종 설계 결과

FR11과 FR12에 대해 요구사항 수정과 추가 분해와 FR2의 재정의, FR11의 요구사항 수정으로 인한 FR42의 일부 수정 결과가 Table 14에 제시되었으며, 이에 대한 전문가 그룹 평가 결과는 Table 15와 같다.

Table 16은 전체 설계행렬의 비연성화 정도에 대한 평가 결과 나타내고 있다. C_R이 기각역에 포함되지 않아 전체 설계행렬은 비연성화 설계가 된 것으로 불수 있다. 하위수준의 설계행렬에 대한 비연성화 평가 결과 FR122가 기준값을 다소 초과한 것을 알 수 있으나, 기준값에 가깝고 전체 설계행렬에 미치는 영향이 작아 무시해도 되는 것으로 판단하였다.

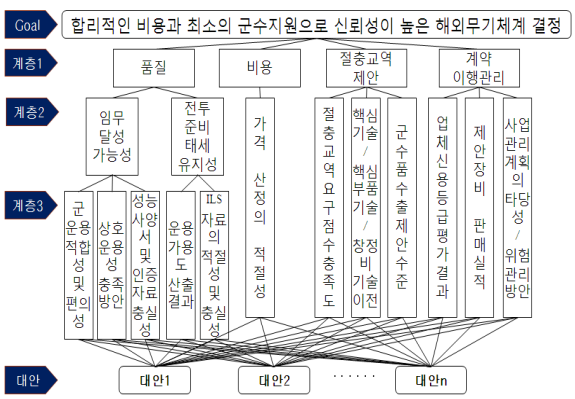

Fig. 5. 평가항목의 계층구조화

라. 평가항목 가중치 산정 및 결과 분석

1) 평가항목 가중치 산정

Fig. 5는 공리적 설계에 의해 설계된 평가항목을 계층구조로 나타낸 것이다. 최종목적은 공리적 설계의 최상위 수준 FR과 동일하게 적용하였으며, 하위 평가기준은 공리적 설계의 각 하위수준별 DPs로 적용하였다.

AHP 기법은 평가자의 지식과 경험 그리고 직관을 이용하여 의사결정의 계층구조를 구성하고 있는 동일 계층내 요소간의 쌍대비교(Pairwise Comparison)를 통

하여 구성요소의 중요도를 결정하는데 유용하게 적용할 수 있다. 우선순위를 결정하는 주요 과정은 첫째, 의사결정문제의 정의 및 계층구조화를 통해 의사결정 계층을 설정하고 둘째, 계층별 각각의 요소에 대한 비교를 수행하여 쌍대비교행렬을 작성하고 셋째, 쌍대비교행렬로부터 고유치방법(Eigenvalue Method)을 사용하여 각 계층내의 의사결정요소의 상대적 중요도(가중치)를 계산한 후 넷째, 일관성 검증을 통하여 일관성 지수(C.I. : Consistency Index)를 경험적 자료로 얻어진 난수지수로 나눈 일관성 비율(C.R. : Consistency Ratio)로 설문응답에 대한 일관성을 검증하여 C.R.≤0.1인 경우에만 가중치 산정에 적용한다[4].

Table 17. 계층별 가중치 산출 결과 및 평가항목 배점 비율

대분류	중분류	세분류	배점 (%)
품질 (0.590)	임무 달성 가능성 (0.663)	군 운용 적합 및 편의성 (0.579)	22.7
		상호운용성 충족 방안 (0.240)	9.4
		성능 사양서 및 인증자료 충실성 (0.181)	7.1
	전투준비태세 유지성 (0.337)	운용 가용도 산출결과 (0.334)	6.6
		ILS 자료의 적절성 및 충실성 (0.666)	13.2
비용 (0.202)	가격 산정의 적절성 (1.000)		20.2
절충교역 제안 (0.082)	절충교역 요구점수 충족도 (0.212)		1.7
	핵심기술 및 핵심부품 제작기술, 창정비 기술 이전 여부 (0.611)		5.0
	군수품 수출제안 수준 (0.177)		1.5
계약이행 관리 (0.126)	업체의 신용등급 평가결과 (0.468)		5.9
	제안장비 판매실적 (0.230)		2.9
	사업관리계획의 타당성 및 위험관리방안 (0.302)		3.8

설문대상은 방위사업청 및 육군의 전력증강분야에 근무하고 있는 인원 22명을 대상으로 실시하였다. 실무지식과 전문적 경험이 있는 집단이 선발된 경우에는 그 집단의 특성이 동질적일 때 그 규모는 10～15명이면 충분[2]하다고 볼 수 있기 때문에 설문대상수는 충분한 것으로 판단하였다. 설문조사 결과 C.R.>0.1인 2명은 제외하고 20명만 적용하였으며, 일관성 비율이 비교적 양호한 이유는 대부분의 설문대상자가 그동안 방위사업청에서 실시한 핵심기술이나 국내 연구개발사업, 용역연구를 위한 제안서 평가항목 가중치 산출을 위한 AHP 쌍대비교 설문에 참여한 경험이 많기 때문인 것으로 판단된다.

설문결과는 쌍대비교행렬의 역수관계를 유지해주는 기하평균법으로 통합하였다. AHP 결과 분석을 위해 Expert Choice 11을 활용하였으며, 계층별 항목에 대한 가중치 산출결과와 평가항목별 배점 비율(%) 결과는 Table 17에 나타내었다. 배점 비율은 공리적 설계 결과의 각 수준과 동일한 AHP 계층별 가중치를 각각 곱하여 계산하였다.

2) 평가항목 가중치 분석

개발된 평가지표의 항목별 가중치와 배점 결과를 살펴보면 대분류에서 가장 중요한 요소는 품질로 나타났는데, 이는 국내 연구개발사업은 개발 초기단계부터 수행되는 각종 설계검토 등의 과정을 거쳐 사용자의 요구사항이 지속적으로 반영된 반면, 해외무기체계의 경우 한 번 구매하면 운용의 불편함이나 적합성 측면에서 다소 제한사항을 가지고 있어도 이를 감수하고 사용해야 하는 문제가 생길 수 있기 때문에 대상장비 선정시 사용자의 운용 적합성을 고려하여 중요도를 높게 평가한 것으로 판단된다. 또한 해외무기체계는 부품의 조달이나 해외정비 등 운용유지의 애로사항을 그동안 많이 경험하였기 때문에 장비 인도 이후 운용유지 단계에서 장비의 안정적 운용 신뢰성을 무엇보다 중요하게 고려한 것으로 분석할 수 있다.

배점 비율에서 가장 높게 나온 상위 세 가지 평가항목을 살펴보면 군 운용 적합성 및 편의성(22.7%)과 계약물에 대한 가격 산정의 적정성(20.2%), ILS 자료의 적절성과 충실성(13.2%) 순으로 나타났으며, 모두 품질과 비용 두 가지 대분류에 포함되는 평가항목이다. 또한 대분류 항목 중 품질과 비용 두 가지 분야에 대한 모든 평가항목 배점 비율을 합치면 79.2%로, 이는 절충교역 제안이나 계약이행관리 분야의 평가항목

에 대한 배점 비율을 모두 합친 것보다 약 4배 정도 높게 나왔는데, 이를 분석해보면 Pre-qualification 단계에서 계약조건과 절충교역 비율, 절충교역 계약조건 등에 대해 이미 충족여부를 확인한 상태에서 제안서 평가를 실시하게 되며, 대부분의 해외무기체계 구매사업의 계약방법을 확정가 계약으로 적용하기 때문에 계약업체의 입장에서는 계약서에 의해 이미 강력한 구속을 받고 있다는 점에서 품질과 비용 분야의 평가항목이 상대적으로 높은 배점 비율로 나온 것으로 분석되었다.

마. 평가지표 활용 가능성 분석

Table 18은 본 연구에서 개발된 제안서 평가의 평가항목과 기존의 제안서 평가에서 적용하고 있는 평가항목 체계를 비교한 내용이며. 이를 분석하면 다음과 같다.

첫째, 제안서 평가를 위한 타당성 있는 평가체계 구축을 통하여 해외무기체계 구매사업 관리자가 대상장비 선정을 통하여 협상에 필요한 자료 획득은 물론 협상의 우위를 차지할 수 있는 기반 마련에 기여할 수 있다. 해외무기체계 구매사업은 이미 앞에서 언급하였듯이 제안서 평가 결과는 최종 사업자 선정이 아닌 협상과 시험평가를 위한 대상장비를 선정하기 위한 절차이다. 기존의 대상장비 선정방법을 적용할 경우 요구항목에 대한 제안업체의 응답여부만 확인되고 선택조건의 응답비율(70% 이상)을 충족하면 대상장비로 선정되는 다소 부적절한 평가 방법을 적용하였다. 그러나 제안서 평가는 발주기관 입장에서 향후 협상과 시험평가에 필요한 자료를 최대한 많이 획득하고 사용자의 운용 적합성과 운용유지 등을 사전에 검토할 수 있는 중요한 단계이다. 따라서 제안업체에게 제안서 평가를 통하여 탈락할 수 있다는 것을 인지시킬 경우 보다 내실있는 자료 획득은 물론 대상장비 선정이 가능할 것으로 본다. 이를 위한 방법으로는 크게 2가지로 볼 수 있다.

- 대안이 2가지 이하인 경우는 최저기준 점수를 선정하여 자격이 되는 장비만 선정하는 방안이다. 국내연구개발사업의 경우에는 기준 점수를 70점으로 하여 70점 미만의 대안은 선정 대상에서 제외하고 있다. 기준 점수 선정은 사업별 특성을 고려하여 사업추진전략 수립이나 전문가 평가에 의해 선정하여 적용할 수 있다.

Table 18. 제안서 평가항목 비교

<기존 평가지표>

분야	평가항목	방법
일정/계약조건/절충교역 비율/조건	장비 인도 일정 충족 표준계약조건 절충교역 비율/조건 충족	필수조건
성능	시험성적서 또는 인증서, 사양서를 통한 요구성능 충족 확인	필수조건
운용 적합성	한국적 작전환경 충족 확인	필수/선택조건
ILS	11대 ILS 요소	필수/선택조건
비용	제안장비에 대한 비용자료	필수조건
절충교역 기술이전	절충교역을 통한 기술이전	필수조건
기타	업체 신용등급과 판매실적을 포함한 각종 자료 확인	필수/선택조건
사업관리	사업관리계획	선택조건

<제안 평가지표>

분야	평가항목	배점 비율 (%)
Pre-Qualification	장비 인도 일정 충족 표준계약조건 절충교역 비율/조건 충족	필수조건
	성능 충족여부 확인	
품질	성능 사양서 및 인증자료 충실성	7.1
	군 운용 적합 및 편의성	22.7
	상호운용성 충족 방안	9.4
	운용 가용도 산출결과	6.6
	ILS 자료의 적절성 및 충실성	13.2
비용	가격 산정의 적절성	20.2
절충교역 제안	절충교역 요구점수 충족도	1.7
	핵심기술 및 핵심부품 제작기술, 창정비 기술 이전 여부	5.0
	군수품 수출제안 수준	1.5
계약 이행관리	업체의 신용등급 평가결과	5.9
	제안장비 판매실적	2.9
	사업관리계획의 타당성 및 위험관리방안	3.8

Table 19. 정량적 항목 평가방법

평가항목	계산방법	계산결과 정규화
운용 가용도 산출결과	$A = \frac{\text{총가동시간}}{\text{총가동시간}+\text{총불가동시간}}$	$\frac{A_{MAX}-A_{\text{평가장비}}}{A_{MAX}-A_{MIN}}$
가격 산정의 적절성	업체 제안가($Cost$)	$Max\left(\frac{Cost_{\text{예산편성가}}-Cost_{\text{평가장비}}}{Cost_{\text{예산편성가}}},\ 0\right)$
절충교역 요구점수 충족도	$\frac{\sum_{i=1}^{n}(\text{합의내용}_i \times \text{등급별배점}) \div (\frac{\text{절충교역이행기간}}{\text{기본계약이행기간}})}{\text{목표가치}\times\text{요망배점}(C\text{등급: 3점})}\times 100$	$\begin{cases}\frac{\text{점수}_{MAX}-\text{점수}_{\text{평가장비}}}{\text{점수}_{MAX}-\text{점수}_{MIN}}, & \text{점수}\geq 100\\ 0, & \text{점수}<100\end{cases}$
군수품 수출제안 수준	군수품으로 수출제안한 실 가격	$\frac{\text{수출제안규모}_{MAX}-\text{수출제안규모}_{\text{평가장비}}}{\text{수출제안규모}_{MAX}-\text{수출제안규모}_{MIN}}$
업체의 신용등급 평가결과	국제 공인 신용평가기관에서 평가한 신용평가 등급	방위사업청 신용등급별 평가 배점표 적용
제안장비 판매실적	제안장비의 자국내 및 해외 판매수량	$\frac{\text{판매실적}_{MAX}-\text{판매실적}_{\text{평가장비}}}{\text{판매실적}_{MAX}-\text{판매실적}_{MIN}}$

Table 20. 정성적 항목 평가방법

<table>
<tr><th>평가유형</th><th>평가방법</th><th>평가결과 종합</th></tr>
<tr><td>유형1
(리커드 5점 척도를 이용한 절대평가)</td><td>요구사항별 절대평가를 실시하여 모두 더한 후 전체 요구사항 개수로 나눔
* 적용 가능 평가항목 : 군 운용 적합 및 편의성, 상호운용성 충족방안
예) 군 운용 적합 및 편의성
<table>
<tr><th>항목</th><th>요구사항</th><th>R1</th><th>R2</th><th>R3</th><th>R4</th><th>R5</th></tr>
<tr><td>1</td><td>야지 기동의 용이성</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td>설치 및 철수의 용이성</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>⋮</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>n</td><td>최소 5개 이상 동시표적추적 가능</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table></td><td>
<table>
<tr><th colspan="2">등급</th><th>점수</th></tr>
<tr><td>R1</td><td>매우 우수</td><td>1</td></tr>
<tr><td>R2</td><td>우수</td><td>0.8</td></tr>
<tr><td>R3</td><td>보통</td><td>0.6</td></tr>
<tr><td>R4</td><td>저조</td><td>0.4</td></tr>
<tr><td>R5</td><td>매우 저조</td><td>0.2</td></tr>
</table>
$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\text{요구사항}_i$</td></tr>
<tr><td>유형2
(대안간 쌍대평가)</td><td>각 평가항목별 대안간 AHP에 의한 쌍대비교로 평가
* 적용 가능 평가항목 : 핵심기술 및 핵심기술 제작기술, 창정비 기술 이전 여부, 사업관리계획의 타당성 및 위험관리 방안</td><td>쌍대비교를 통하여 산정된 대안별 가중치 적용</td></tr>
<tr><td>유형3
(복합형태의 절대평가)</td><td>요구사항에 대한 자료 제시여부와 제시된 자료의 충실도(유형1 평가방법)를 곱하여 평가
* 적용 가능 평가항목 : 성능사양서 및 인증자료 충실성, ILS 자료의 적절성 및 충실성
예) ILS 자료의 적절성 및 충실성
<table>
<tr><th rowspan="2">항목</th><th rowspan="2">요구사항</th><th rowspan="2">제출 여부
(S=0 또는1)</th><th colspan="5">충실도(A)</th></tr>
<tr><th>R1</th><th>R2</th><th>R3</th><th>R4</th><th>R5</th></tr>
<tr><td>1</td><td>정비계획자료</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td>장비를 구성하는 총 부품목록과 부품별 MTBF, 조달기간, 단가</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>⋮</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>n</td><td>정비 및 보급시설</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table></td><td>$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}S_i \times A_i$</td></tr>
</table>

- 대안이 3가지 이상인 경우는 기준 점수를 충족한 대안 중에서 제안서 평가 결과 상위 2개 대안만 선정하는 방법이다.

둘째, 기존에는 요구항목에 대한 응답여부 확인으로 평가하는 방법에서 개발된 평가지표는 정성적 · 정량적 평가항목을 포함시켜 종합점수화 함으로써 합리적 비용으로 신뢰성이 높은 무기체계를 선정하는 평가 목적 달성이 가능하다. 운용가용도 산출 결과, 절충교역 요구점수 충족, 군수품 수출제안 수준, 신용등급 평가결과, 제안장비 판매실적 등과 같은 정량적 평가항목이 포함되기 때문에 평가결과의 정확성을 증가시켜 평가결과에 대한 신뢰성 제고라는 효과와 함께 경쟁여건 조성으로 궁극적으로는 사용자에게 최상의 무기체계 획득 기회를 제공할 수 있는 것이다. Table 19는 정량적 평가항목에 대한 평가방법을 예로 제시하였다.

정성적 평가항목의 경우는 사업별 특성에 따라 다양한 요구사항이 있을 수 있기 때문에 정량적 평가항목처럼 평가항목별 구체화된 계산방법을 설정할 수 없지만 Table 20과 같은 유형별 계산방법 적용에 의해 평가가 가능하다.

셋째, 자료의 충실성에 대한 평가가 가능하다. 기존 평가체계는 요구항목에 대한 제안업체의 응답여부만 확인하기 때문에 자료의 충실성이나 신뢰성에 대한 평가는 현실적으로 어려움이 있다. 그러나 개발된 평가지표의 경우 무기체계 성능 사양서나 인증자료, ILS 자료의 제출여부는 물론 내용의 충실도와 신뢰성 등을 평가할 수 있기 때문에 협상단계에서 추가 자료 요구로 인한 협상력 약화 문제와 부실한 자료 획득으로 인한 향후 운용유지의 애로사항을 해결할 수 있다. 넷째, 배점의 폭이 군 운용 적합성 및 편의성과 ILS 자료의 적절성 및 충실성, 상호운용성 충족 방안, 운용 가용도 산출 결과 등 사용자에게 직접 영향을 미치는 분야에 크게 할당됨으로써 무기체계 획득 이후 운용유지 기간 동안의 운용 신뢰성 향상에 기여할 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구방향

국방분야 해외무기체계 구매사업의 협상력 강화와 실질적인 제안서 평가를 위한 평가지표 개발을 위해 본 연구에서는 계층적 구조 설계는 공리적 설계를, 각각의 가중치는 AHP기법을 사용하여 제안서 평가항목을 개발하였다. 이를 위해 먼저 장비 구매 또는 공급자 선정과 관련된 해외문헌 연구와 방위력개선사업의 해외무기체계 구매사업 사례분석, 관련규정 및 정책검토를 통하여 평가를 위한 공통분야를 도출하였으며, 이어서 공리적 설계 기법을 이용하여 평가 항목 설계 및 계층화를 구성하고, AHP 기법을 이용한 가중치를 산정하여 제안서 평가지표를 개발하였다.

본 연구에서 개발한 제안서 평가지표는 기존의 제안서 평가와는 달리 무기체계 구매이후의 운영유지 측면과 사용자의 운용 적합성 및 편의성을 반영한 평가가 될 수 있도록 평가항목에 구성하였다. 따라서 제안서 평가를 통하여 나타난 결과는 다음 단계인 협상과 시험평가에 반영될 수 있으며, 이를 통하여 발주기관의 협상력 제고는 물론 사용자가 요구하는 최소의 비용으로 최상의 장비를 선정할 수 있을 것으로 예상한다.

또한, 본 연구에서 적용한 공리적 설계 기법의 설계행렬 평가는 기존의 공리적 설계에서의 설계행렬 평가 방법을 보다 구체화함으로써 산업공학 분야 중 기계 · 역학 · 물리적 영역의 성격이 약한 분야에 대한 공리적 설계 기법 적용을 보다 용이하고 실질적인 적용이 가능하도록 하였다.

향후에는 설계행렬 평가와 관련하여 현재는 퍼지 개념을 적용한 단순 산술평균에 의해 전문가 그룹 평가결과를 종합하였으나, 이에 대한 보다 개선된 평가결과 종합이 필요하며, 개발된 평가지표를 활용한 실제 사례 적용을 통한 평가지표의 유효성 분석이 필요하다.

References

[1] 방위사업관리규정, 방위사업청, p. 102, 2010.
[2] 경태원, 김상국, “AHP 기법을 이용한 IT 프로젝트 관리 우선순위 수립에 대한 연구”, Information Systems Review, Vol. 9(3), pp. 157～181, 2007.
[3] 김찬수, 조규갑, “국방핵심기술 연구개발의 제안서 평가를 위한 평가지표 개발에 관한 연구”, IE Interfaces, Vol. 21(1), pp. 96～108, 2003.
[4] 이형준, 김우제, 김찬수, “국방연구개발 시험개발사업 성과평가지표 개발에 관한 연구”, IE Interfaces, Vol. 23(1), pp. 78～88, 2010.

[5] 차성운, 박경진 역, Axiomatic Design, 동명사, 서울, pp. 142～146, 2009.

[6] Cebi, S. and Kahraman, C., "Developing a Group Decision Support System Based on Fuzzy Information Axiom", Knowledge-Based Systems Vol. 23, pp. 3～16, 2010.

[7] Cebi, S. and Kahraman, C., "Extension of axiomatic Design Principles under Fuzzy Environment", Expert Systems with Applications Vol. 37, pp. 2682～2689, 2010.

[8] Cebi, S. and Kahraman, C., "Indicator Design for Passenger Car using Fuzzy Axiomatic Design Principles", Expert Systems with Applications Vol. 37, pp. 6470～6481, 2010.

[9] Ho, W., Xu, X. and Dey, P., "Multi-criteria Decision Making Approaches for Supplier Evaluation and Selection : A Literature Review", European Journal of Operational Research, Vol. 202, pp. 16～24, 2010.

[10] Kulak, O. and Kahraman, C., "Multi-attribute Comparison of Advanced Manufacturing Systems using Fuzzy vs. Crisp Axiomatic Design Approach", International Journal of Production Economic, Vol. 95, pp. 415～424, 2005.

[11] Suh, N. P., "Axiomatic Design Theory for Systems, Research in Engineering Design", Vol. 10, pp. 189～209, 1998.

[12] Saaty, T. L., "How to Make a Decision : The Analytic Hierarchy Process", European Journal of Operational Research, Vol. 48, pp. 9～26, 1990.