

초기단계 합정설계시 설계영역탐색의 효과적 적용

박진원* 박상일

해군 전력분석시험평가단 합정기술처

Effective Application of Design Space Exploration in the Very Early Naval Ship Design

Jinwon Park*, Sangil Park

1) *Naval Engineering Division in Naval Force Analysis, Test and Evaluation Group of ROKN*

Abstract : The early-phase naval ship design demands requirements synthesis rather than design synthesis, which conducts engineering design for several domains on a detailed level. Requirements synthesis focuses on creating a balanced set of required operational capabilities satisfying user's needs and concept of operations. Requirements are evolved from capability based languages to function based language by statistical exploration and engineering design which are derived in the following order: concept alternative, concept baseline, initial baseline and functional baseline. The early-phase naval ship design process can be divided into three passes: concept definition, concept exploration and concept development. Main activities and outcomes in each pass are shortly presented. Concept definition is the first important step that produces a concept baseline through extensive design space exploration promptly. Design space exploration applies a statistical approach to explore design trends of existing ships and produce feasible design range corresponding to concept alternative. It further helps naval systems engineers and operational researchers by inducing useful responses to user and stakeholders' questions at a sufficient degree of confidence and success in the very early ship design. The focus of this paper is on the flow of design space exploration, and its application to a high-speed patrol craft. The views expressed in this paper are those of the authors, and do not reflect the official policy or rule of the Navy.

Key Words : Naval Ship Design, Design Space Exploration, Naval architecture, Naval engineering, Operational Research, Systems Engineering, Concept Baseline, Statistics, Histogram, Design of Experiment, Regression Analysis, Artificial Neural Network, High-speed patrol craft

* 교신저자 : Jinwon Park, jwpark1@gmail.com

* This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

함정은 센서, 무장, 네트워크 및 플랫폼의 통합된 전체이다. 함정설계는 이러한 고유의 통합성과 복잡성을 다루기 위한 퓨전 기술로서 조선공학, 기관공학, 전기/전자공학 그리고 심지어 운영분석을 포함한 여러 학문 분야의 조합을 필요로 한다. 우리 함정획득체계는 2006년 방사청 개칭, 2010년 시스템엔지니어링(Systems Engineering)의 의무적 적용, 2013년 일반 무기획득체계와의 철차 통합과 같은 큰 틀의 변화를 경험하였다. 특히 소요기획체계는 성능 중심의 요구조건 도출체계에서 능력 중심의 체계로 전환된 것이 주목된다. 현재의 위협과 작전환경은 물론 미래 예상되는 그것들을 성능(what; solution) 위주가 아닌 기능(how; function) 위주로 고민하여야 한다는 의미이다.

Figure 1 중간 부분의 함정설계 프로세스는 프레임워크인 SE를 기반으로 한 순차적 공학 설계 활동이다. 체계요구조건검토(SRR), 체계기능검토(SFR)와 같은 시스템엔지니어링 기반의 설계검토와 함께 단계별 요구되는 공학설계의 점근적 구체화(“Narrower and Deeper”)를 병행한다. 최근 국내 함정공학커뮤니티는 이러한 변화에 부응하기 위해 초기단계 설계프로세스의 혁신적 재정립과 창의적인 SE 도구의 도입과 적용을 적극 시도하고 있다. 앞으로도 계속될 획득체계의 진화와 함께 끊임없이 고민하고 노력해야 하는 분야이다.

본 논문은 소요기획을 위한 초기단계(건조가능성, 개념설계) 함정설계 프로세스를 간단히 살펴보고, 이 단계에서의 신속하며 논리적인 의사결정을 지원하는데 있어 효과적인 설계영역탐색(Design Space



[Figure 1] ROK defense acquisition system and naval ship design process

Exploration) 적용 방안을 제시한다.

2. 초기단계 함정설계 프로세스

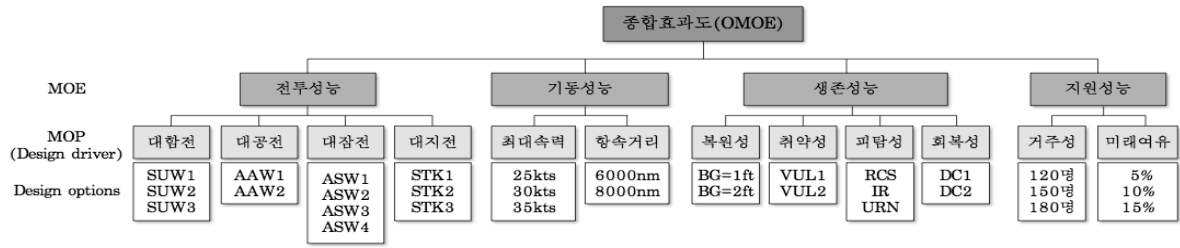
초기단계 함정설계는 설계조합(Design synthesis)을 목적으로 하는 탐색개발(기본설계) 이후 활동과 달리 소요기획 지원을 위한 요구조건 조합(Requirements synthesis)에 무게를 둔다. 즉, 기본설계 이후와 같이 구체적인 기술 사양과 기능을 도출하기 보다는 군의 요구를 충족하는 개략적인 작전운영능력(안)을 도출하는 것이다. 최근 한국해군 주도로 이루어지고 있는 초기단계 함정설계의 일반적인 로드맵은 Figure 2와 같다. 3 Pass-3 Gate로 구성되었으며 각 단계별 주요활동, 설계검토 및 산출물을 포함한다. 각 Pass별 주요활동과 산출물은 함정별로 상이할 수도 있으나 큰 차이는 없다.

2.1 Pass 1 : 개념생성 단계

먼저 운영분석자(Operational researcher)는 대상 함정에 대한 위협과 작전환경 그리고 대상체계의 필요성과 운용개념(안) 분석을 수행한다. 운영분석자는 군의 요구와 운용개념을 충족하는 복수의 초기 개념대안(Concept alternative)을 제안한다. 초기 개념대안은 구체적인 설계결과(성능)가 아니라 대상함정의 전투, 기동 및 기타 주요능력을 말하는 참고기준이며, 가능한 능력 위주의 정성적 표현이어야 한다. 초기 개념대안을 토대로 함정 설계 경



[Figure 2] A roadmap of early-phase ROKN ship design process



[Figure 3] An example of Overall Measure of Effectiveness (OMOE) Hierarchical Model

험과 지식, 데이터 처리/분석 능력을 보유한 함정설계자는 정량화를 위한 설계영역탐색에 착수한다.

함정설계자는 설계영역탐색을 통해 개념대안별 적용 가능한 최신 기술의 탐색적 분석과 설계가능 범위 등을 포함한 좀 더 구체화된 결과물을 도출한다. 설계가능범위는 연속형인 최대속력, 함 길이 등은 범위로 이산형인 추진기 형태, 선체재질 등은 범주(선택)로 표현한다. 운영분석자와 함정설계자는 대상함정이 반드시 충족하여야 하는 핵심성능변수(KPP) (안)과 함정성능변수(Ship Performance Parameter) 중 Pass 2 개념탐색 단계에서 대안분석(Analysis of Alternatives) 항목인 설계인자(Design driver)도 이때 함께 고민한다. 운용요구조건검토(Operational Requirement Review)는 Pass 1에서 분석/종합된 복수의 정량화된 개념대안 중 이해관계자의 요구와 선호에 따라 1개 또는 2개의 최적안, 즉 ‘개념베이스라인’을 선정하는 의사결정 회의이다. ORR에는 함참, 방사청, 해군, 국과연 및 외부 전문가가 참여한다. Pass 1은 보통 2개월 이내에 완료된다. 개념베이스라인은 이후 단계를 위한 중요한 설계기준으로 너무 장기간이 걸려서도 그 수준이 너무 구체적이거나 단순해서도 안 된다. 본 단계에서의 중요한 또 다른 활동으로 주어진 요구조건 분석을 토대로 함정의 전투, 기동, 생존 및 지원성능에 대한 시스템아키텍팅을 수행한다 [1, 9].

2.2 Pass 2 : 개념탐색 단계

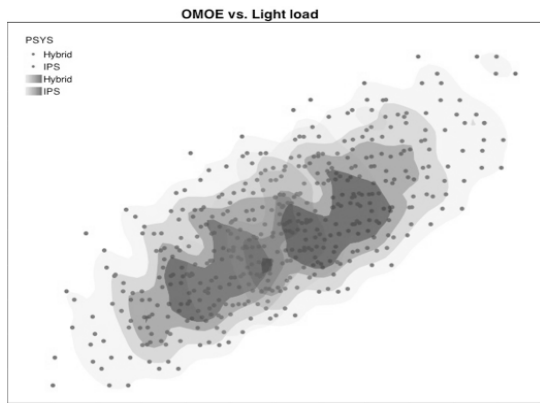
ORR에서 선정된 개념베이스라인을 토대로 분야별 설계대안을 조기에 확정짓지 않고 열어두고 폭

넓게 검토한다. 개념생성 단계에서 도출된 설계인자(Design driver)별 복수 설계옵션(Design option)을 도출한다. 옵션에 따른 종합효과도 모델(Overall Measure of Effectiveness Hierarchical model)을 Figure 3의 참고 예를 토대로 개발하고, 각 설계 옵션별로 플랫폼에 미치는 설계영향(Design impact)을 독립적으로 분석한다. 여기서 독립적 분석이란 ‘공리설계’에서 요구하는 독립공리와 정보공리를 만족하게끔 플랫폼 통합설계 관점에서 설계옵션의 영향분석을 해야 한다는 의미한다[2].

- 1) 독립공리 : 기능적 요구사항의 독립성을 유지하라.
- 2) 정보공리 : 설계 정보량을 최소화하라.

설계영향은 옵션별 성능 지수(Measure of Performance), 중량 증감, 함 크기 증감, 소요마력 증감, 무게중심 증감, 획득비용 증감 등을 말한다. 옵션과 설계영향 분석결과는 통계적 수단인 실험계획법에 의해 복수의 설계 케이스로 조합된다. 함정에 따라 다르나 그 수는 수십, 많게는 수만 개에 이른다. 각 대안별로 성능지수(MOP)를 총합하여 종합효과도(OMOE)를 계산한다. 옵션별 상대적 성능지수(MOP) 정의에서 연속형 변수는 효용함수기법(Utility Function Method), 대공/대함전 센서 및 무장 조합 등의 범주형 변수는 계층적분석법(AHP)이나 교전시뮬레이터를 이용하여 특정 시나리오에서의 대안별 상대적 생존율을 적용한다.

조합된 복수 케이스는 Figure 4와 같이 획득비용(주로 중량 기반) 대비 종합효과도(OMOE)에 대한 2차원 그래프로 표현되어 실시간, 가시적으로 비교 분석된다. 각 점은 하나의 설계해(Design solution)



[Figure 4] Light load vs. OMOE Optimization Chart

를 의미한다. 대안체계검토(Alternative System Review)는 Figure 4와 같이 도출된 복수 대안에 대해 운용자, 설계전문가, 사업전문가 및 합참 등 이해관계자의 참여하에 획득비용(중량) 대비 종합 효과도 측면에서의 적정성 분석(Trade-off)을 통해 1~2개 정도의 ‘성능베이스라인’으로 좁혀진다. Pass 2는 함종 및 크기에 따라 다르지만 보통 3~5개월 정도 소요된다.

2.3 Pass 3 : 개념개발 단계

Pass 2 대안체계검토(ASR) 결과물인 성능베이스라인에 대한 공학적 설계와 분석을 수행한다. 성능베이스라인에 대한 선형개발(Hull-form development), 복원성능(Stability) 및 구조해석 등을 수행하며 관련 도면과 보고서 작성, 총 수명주기비용 추정을 포함한 획득전략을 수립한다. Pass 3도 함종과 그 규모에 따라 다르지만 보통 3~5개월 정도 소요된다. 성능베이스라인의 공학적 정제와 구체화를 통해 시스템 요구조건(기능, 성능 및 인터페이스 요구사항)을 담은 ‘기능베이스라인(안)’이 도출된다. 기능베이스라인은 탐색개발(기본설계) 단계의 입력이 된다. 필요시 대안별 총 수명주기 비용과 획득전략만을 검토하는 별도의 설계검토가 수행될 수도 있다. 기능베이스라인(안)을 토대로 합참 통합개념팀(Integrated Concept Team)은 작전운용능력(ROC)(안)을 포함한 전력소요서를 작성하며, 합동참모회의(또는 전략회의) 의결을 거쳐 소요가 확정되고,

국방부 주관의 방위사업추진위원회를 통해 사업추진이 결정된다.

대상함정별 사업특성 및 규모가 상이하여 Pass의 구분을 명확히 하기는 어렵지만 Pass 1-2가 건조가능성 검토, Pass 3이 개념설계 영역이라고 말할 수 있다. 최근 수행한 다수의 한국해군 초기단계 설계프로젝트에서 Figure 2 프로세스를 적용하여 그 적합성을 시험 해본바 있다.

본 논문은 지면의 제약, 논의의 선택과 집중을 위해 초기단계 설계중 개념베이스라인 도출을 위한 설계영역탐색 프로세스와 적용 예를 아래 절에서 자세히 살펴 보도록 한다.

3. 개념베이스라인 도출을 위한 설계영역탐색 적용

3.1 설계영역탐색 도입 배경 : 의사결정의 어려움

의사결정은 불확실성, 모호성, 복잡성, 가치 상충, 시간 제약 등의 어려움을 근본적으로 내포하고 있다. 무기체계획득과 같이 많은 자원과 이해관계자가 관련된 경우 그 어려움은 배가된다. 의사결정에 관한 심도 깊은 이론 연구는 공학계뿐만 아니라 사회과학 분야에서도 자주 다루어지고 주제이다.

사회선택이론으로 유명한 ‘에로의 불가능성 정리’에 따르면 세 개 이상의 서로 다른 대안이 제시될 때 어떤 절차나 제도도 공동체의 일관된 선호를 찾을 수 없다고 한다[3]. Sheena Lyengard와 Mark Lpper는 사람들은 너무 많은 대안에 압도당하며 선택할 수 있는 대안을 증가시키는 것은 사람들을 쫓아 버린다는 흥미로운 개념인 ‘선택의 역설’을 제시한바 있다[4]. 즉, 유사한 대안이 너무 많으면 사람들은 혼란스러워 하며, 비슷한 대안이 여럿 주어지는 경우 오히려 선택을 거부할 수도 있다는 것이다. 반대로 단 하나의 대안만 주어지는 것도 사람들은 싫어한다고 한다. 각론의 여지는 있으나 사람들의 의사결정에 유리한 수는 3개가 베스트라고 생각한다. 하나로 하면 추상적이 되기 쉽고 다섯으로 하면 강약이 떨어질 수도 있기 때문이다. 이에 추가하여

효과적인 의사결정모델 개발을 위해서는 분명한 절차와 가이드라인이 제공되어야 한다. 이러한 이해와 바탕 없이 때에 따라, 사람에 따라 그 수준과 산출물이 상이할 경우 의사결정 과정 자체의 신뢰성을 의심받을 수도 있기 때문이다.

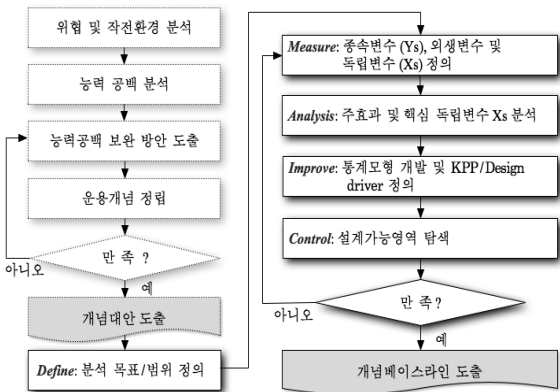
국내 함정 공학 커뮤니티는 지난 5년간 다양한 초기단계 함정설계 프로젝트 경험을 통해 설계영역 탐색 절차의 발전적 진화를 거듭하고 있다. 프로젝트에 따라 성과의 차이가 있기는 하나 Batch형 함정의 개선 반복 설계(Modified repeat design)보다는 미래형 함정 설계를 위한 신조 설계(New ship study)에서 더 많은 성과를 거둘 수 있었다. 아래 절에서는 초기단계 함정설계시 설계영역탐색의 효과적 적용을 위한 절차를 살펴본다. 주어진 절차가 어떤 시스템, 심지어 모든 함정/선박에도 보편적으로 적용될 수 있다고 자신할 수는 없다. 절차는 프레임워크(기본개념구조)를 말하는 것이지 절대적인 규칙을 이야기하는 것이 아니기 때문이다. 따라서, 이의 적용은 각 시스템의 특성과 개발자의 역량에 따라 조정하여 적용할 필요가 있음을 강조한다.

3.2 설계영역탐색 절차

설계영역탐색은 Figure 2의 첫번째 개념생성 단계에서의 주요 방법이다. 유사함정의 설계정보 데이터베이스를 기반으로 통계 분야에서 많이 활용되는 산점도, 박스그림, 히스토그램 등의 분석 차트를 이용하여 관련 기술의 발전 추세와 분포를 탐색하고,

군의 요구와 운용개념을 충족하는 최적의 설계가능 범위를 통계적으로 도출한다. 이 활동의 최종 산출물이 곧 ‘개념베이스라인’이다. 설계영역탐색은 운영분석자에 의해 도출된 정성적 초기 개념대안으로부터 시작된다.

설계영역탐색 절차는 식스시그마의 DMAIC (Define-Measure-Analysis-Improve-Control) 을 참고하였다[4]. Define 단계는 운용개념 분석의 결과물인 초기 개념대안에 대한 분석 목표와 범위를 정의한다. Measure단계는 대상함정과 유사한 실적함정 설계데이터 수집으로 시작된다. 대상함정의 최적화 목적함수로 활용될 종속변수 Y와 함정 기본 성능과 관련된 변수를 독립변수 X로 정의한다. 그리고 제3의 변수인 외생변수도 정의한다. 외생변수는 종속변수와 설계자가 통제할 수 있는 독립변수 외에 종속변수에 영향을 미칠 수 있지만 설계자의 통제가 제한되는 기타 변수를 말한다. 변수 정의 과정은 충분한 데이터 분석/처리 능력과 더불어 함정설계에 대한 경험과 지식을 동시에 요구한다. 이후 정의된 변수들의 분포와 변수들 간의 상관관계를 도식적으로 파악한다. 상관관계 분석은 변수들 간의 숨은 관계를 파악하는데 있어 유용하다. 전투함에 있어 Y는 함 크기, 비용, 톤수가 될 수 있으며 X는 속도, 항속 거리와 같은 연속형 변수는 물론 추진체계 형식, 센서/무장 조합 등의 범주형 변수가 선택될 수 있다. 변수 선정은 대상함정의 특성과 요구조건에 따라 상이할 수 있으며 필요시 수정될 수 있다. 대상함정의 특성에 따라 X가 Y, Y가 X가 될 수도 있다. Analysis단계는 통계의 스크리닝(Screening)이나 분산분석(Analysis of variance)을 통해 Y에 대한 X의 주효과를 분석하여 핵심 독립변수 X(Vital few Xs)를 식별한다. Improve 단계는 회귀분석 또는 인공신경망 분석을 통해 Y에 대한 통계모형을 개발하여 개념대안별 개략 설계범위를 예측한다. 운영분석자와 함정설계자간의 토의를 통해 운용개념 충족을 위한 핵심성능변수(KPP) (안)와 설계인자(Design driver)를 이 단계에서 정의할 수 있다. 물론 KPP와 Design driver는 이후 과정에서 변경(추가/삭제



[Figure 5] Design Space Exploration Flow

/수정)될 수 있다. Control 단계는 개념대안별 설계 설계가능범위를 광범위하게 탐색하여 의사결정 지원을 위한 개념베이스라인(안)을 제안한다. 설계가능범위는 통계분석 결과의 중심추세와 분포에 따라 평균과 표준편차 또는 사분위수 범위로 설정된다. 설계영역탐색을 위해 본 논문에서는 통계분석용 상용 소프트웨어인 SAS JMP 프로그램을 사용한다[6].

3.3 설계영역탐색 적용 예 : 가상의 고속경비정

3.3.1 정의단계

서해 NLL 인근에서 남하하는 적 침투 세력에 대응 가능한 ‘가상의 고속경비정’에 대한 F+X년 장기 소요 요청을 위한 건조가능성 검토를 의뢰받았다고 가정한다. 운용개념(안)은 전·평시로 나누어 제시되었으며 이를 만족하기 위한 개략 작전운용성능(안)-개념베이스라인을 제출토록 요구받았다.

자료조사 및 분석 등을 통해 운영분석자는 최후군의 운용개념(안)을 충족하는 능력기반의 초기 개념대안 3종을 아래와 같이 제시한다.

<Table 1> Initial Concept Alternatives of High-speed Patrol Craft

구분	대안 1	대안 2	대안 3
운용개념	추격 격파	접근 거부	항만 방어
작전범위	해안~20마일	해안~12마일	해안~5마일
기동능력	추격 가능	접근 기동	순찰 기동
전투능력	격파/침몰	기동 불능	위협 사격

대안 1은 적 침투세력에 대해 고속 기동하여 추격 격파할 수 있는 능력을 가져야 하며 작전범위는 해안으로부터 20마일 내이다. 대안 2는 적의 침투를 거부하는 수단으로 적과 교전시 적 함정을 기동 불능 상태로 만들 수 있는 능력을 가져야 한다. 대안 3은 해안으로부터 5마일 이내 내해에서 적 침투를 사전 인지하기 위한 순찰 기동을 실시하며 접근 거부를 위한 위협 사격 수준의 전투능력을 보유하여야 한다.

이에 상기 개념대안에 대한 설계영역탐색 목적을

아래와 같이 정의한다.

- 1) 적용 가능 최신기술 분석
 - 선형(Hull form)
 - 최대속력 범위(Maximum speed range)
 - 적용재질 및 추진기 형식 등
- 2) 분야별 대안 분석 : 추진기 대안 등
- 3) 개념대안별 설계가능범위 예측치 도출
- 4) 개념베이스라인 도출 지원

분석 범위는 대상 고속정과 유사한 운용개념을 가진 국내·외 유사 고속정을 포함한다.

- 1) 만재톤수 50톤~200톤급
- 2) 최대속력 30노트~50노트급

3.3.2 측정단계

정의된 설계영역탐색 범위에 따라 함정 설계자(데이터 분석자)는 대상 고속정과 운용개념이 유사한 국내·외 유사정 32척의 설계자료를 광범위하게 수집하여 스프레드시트 형태로 종합한다[7].

<Table 2> Design Database taken from Domestic and International High-speed Patrol Crafts

Class	Year	L	B	T	Full Disp.	Max Speed	Power(HP)	Hull form	Weapon	Propulsor	MAT	L/B	B/T
1 KANASIS	2007	35.6	6.7	1.4	120	52	7398	Planing	20mm	Waterjet	GRP	5.334	4.7827
2 KANASIS	2001	31.7	6.2	1.4	85	47	7398	Planing	12.7mm	Waterjet	GRP	4.2113	4.2827
3 Trinity Marine	1997	24.9	5.4	1.5	69	47	4570	Planing	30mm	Waterjet	AL	4.6111	3.5
4 Interceptor	2002	26	6.6	1.8	90	52	5470	Planing	7.62mm	Waterjet	AL	3.894	3.667
5 Shadok MKII	2009	24.8	6	1.8	59	48	4570	Planing	12.7mm	Waterjet	AL	4.1533	5.75
6 Super Dvora MKII	2004	27.4	5.7	1.1	73	45	7398	Planing	20mm	Waterjet	AL	4.807	5.1818
7 KANASIS	2001	31.7	6.2	1.4	85	47	7398	Planing	12.7mm	Waterjet	GRP	4.2113	4.2827
8 MANK V	1995	25	5.3	1.5	70	50	4670	Planing	12.7mm	Waterjet	AL	4.717	3.6333
9 Super Dvora MKII	2004	27.4	5.7	1.1	73	45	5470	Planing	20mm	Waterjet	AL	4.807	5.1818
10 KANASIS(WPFI)	2004	35.7	6.9	1.4	126	43	7398	Planing	20mm	Waterjet	GRP	5.1729	4.9285
11 Heywood	2001	50.1	8.4	4.2	244	44	16200	Semi-planing	76mm	Waterjet	AL	3.9643	2
12 Baywatch GIG3	1986	24	5.5	0.9	52	43	5260	Planing	20mm	Waterjet	AL	4.2636	6.1111
13 Poseidon	1991	24.5	5.7	1.2	59	42	4280	Displacement	12.7mm	Waterjet	AL	4.3158	4.75
14 Seawings Protector	2007	26.1	6.1	1.6	118	40	7200	Planing	12.7mm	Waterjet	AL	4.2287	4.6267
15 Takasugi	1992	35	6.7	1.3	183	35	5200	Semi-planing	12.7mm	Waterjet	AL	5.2239	5.1538
16 Conquest	1999	28.9	7.6	1.2	93	43	5800	Semi-planing	30mm	FPF	GRP	3.2602	6.3333
17 KAITAL	1985	42.5	7	2.4	193	42	12000	Semi-planing	40mm	FPF	GRP	6.0714	2.9167
18 Biglari	1987	28.8	7	1.1	100	42	6600	Semi-planing	30mm	FPF	GRP	4.1143	6.2636
19 THAS	1984	44.9	7	2.3	259	41	13640	Semi-planing	76mm	FPF	GRP	6.4143	3.0555
20 MUBARHAZ	1990	44.9	6	2.2	264	40	9970	Semi-planing	76mm	FPF	AL	7.4833	2.7273
21 BANONG	1980	44.9	7	2.6	264	40	13640	Semi-planing	30mm	FPF	AL	6.4143	2.8
22 Ahmad al Fateh	1989	44.9	7	2.5	259	40	13640	Semi-planing	76mm	FPF	ST	6.4143	2.8
23 Ahnima	1989	52.1	7.2	2.9	269	40	13500	Semi-planing	40mm	FPF	AL	8.855	2.5712
24 PRABHAMAPAK	1978	45.4	7.4	2.3	272	40	13640	Semi-planing	57mm	FPF	AL	6.1351	3.2174
25 KOMAR	1980	25.6	7.3	1.9	86	40	4400	Semi-planing	25mm	FPF	ST	3.0088	4.0256
26 Hurydyeh	1980	26.6	7.6	2.7	208	35	12000	Semi-planing	30mm	FPF	ST	5.0789	2.8148
27 OSA	1972	38.6	7.6	2.7	213	35	8025	Semi-planing	30mm	FPF	ST	5.0789	2.8148
28 Al Liban	1984	26.2	5.3	2.1	87	34	5800	Semi-planing	20mm	FPF	ST	4.5172	2.7619
29 Spaviero	1995	21.8	7	1.4	80	48	5000	Hydrofoil	20mm	FPF	GRP	3.1143	5
30 FCM	1978	37	6.6	2.3	195.5	38	7400	Semi-planing	40mm	FPF	ST	3.8681	2.8686
31 PK	1973	25.6	5.4	1.5	75.5	38	5800	Semi-planing	40mm	FPF	ST	4.2407	3.6
32 VLBI-P	1983	26.1	5.6	1.1	66.5	30	3728	Semi-planing	20mm	Waterjet	GRP	4.6607	5.0909

과제제거자는 Table 1의 초기 개념대안 3종을 승인하였으나, 획득비용 절감과 중복전력 확보 비판을 피하기 위해 가능한 중량을 최소화하도록 요구하였다. 이에 분석과정에서 최적화 목표함수는 ‘만재톤수의 최소화’, 즉 만재톤수를 종속변수 Y로 정의한다.

- 만재톤수(Full disp.)
- 종속변수에 영향을 줄 수는 있으나 독립변수(X)만에 의한 순수한 영향력을 조사하기 위해 아래 변

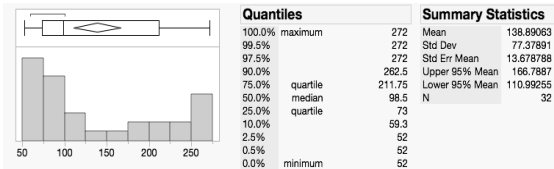
수들은 외생변수로 정의한다. 아래 4가지 변수는 설계자의 통제보다는 종속변수와 같이 독립변수에 의해 영향 받는 변수이므로 통계모형 개발시 의사(Pseudo) 종속변수로 취급한다.

- 길이(L)
- 폭(B)
- 흘수(T)
- 소요마력(Power(HP))

데이터베이스로부터 확보 가능하며, 일반적인 함정성능과 관련된 독립변수(X)는 아래와 같이 정의한다. 독립변수는 설계자에 의해 통제(조정)가 가능한 변수를 말한다.

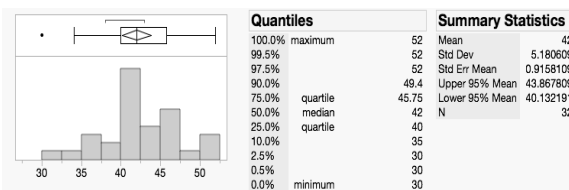
- 최대속력(Max speed)
- 선형(Hull form)
- 주무장(Weapon)
- 추진기형식(Propulsor)
- 선체재질(GRP)
- 승조원수(Crew)

각 변수의 추세와 분포를 살펴본다.

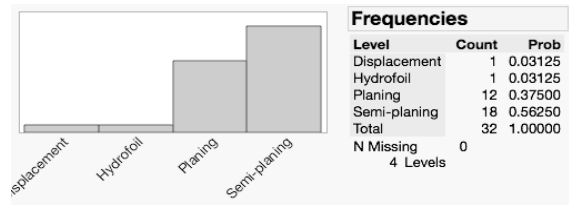


[Figure 6.1] Distribution of Full Displacement

종속변수인 만재톤수는 평균을 중심으로 양 끝단에 치우친 분포를 보인다. 정규분포를 따르지 않으므로 만재톤수는 사분위수 범위(Interquartile Range, 25%~75%)로 범위를 확인한다. 약 73톤~211톤



[Figure 6.2] Distribution of Maximum speed

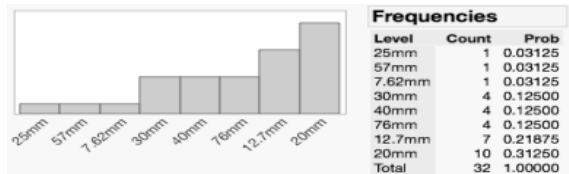


[Figure 6.3] Distribution of Hull form

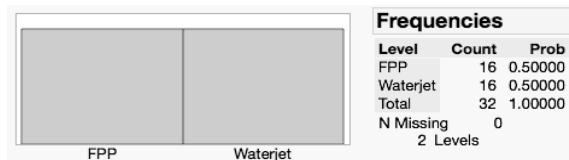
범위의 고속경비정이 국내·외 해군 또는 해안경비대에서 주로 운용 중인 것으로 확인된다.

독립변수인 최대속력의 경우는 정규분포와 유사한 형태의 분포를 보이므로 평균과 표준편차를 통해 유사 고속경비정의 설계범위를 확인한다. 국내·외 운용 중인 고속경비정의 평균적인 최대속력은 40~45노트 범위임을 확인할 수 있다.

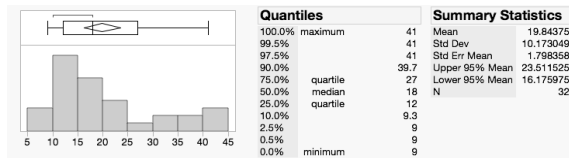
선체의 수면 아래 형상인 선형(Hull form)의 경우 고속 기동에 유리한 활주형(Planing)과 반활주형(Semi-planing)을 주로 채택하고 있다.



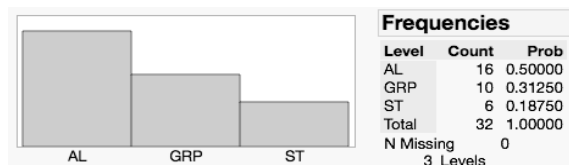
[Figure 6.4] Distribution of Main gun



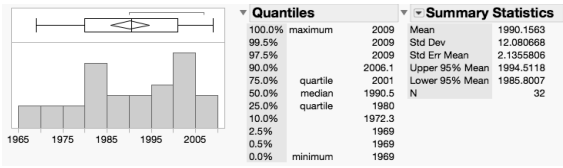
[Figure 6.5] Distribution of Propulsor



[Figure 6.6] Distribution of Crew number

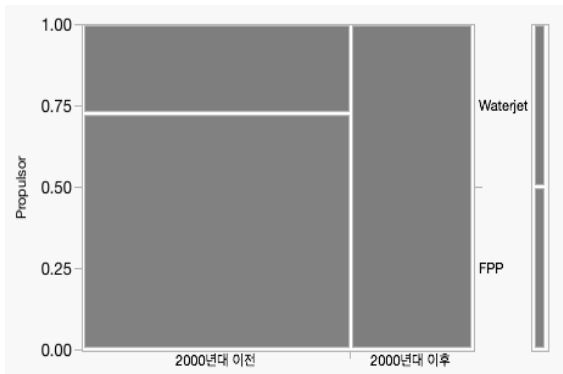


[Figure 6.7] Distribution of Hull material

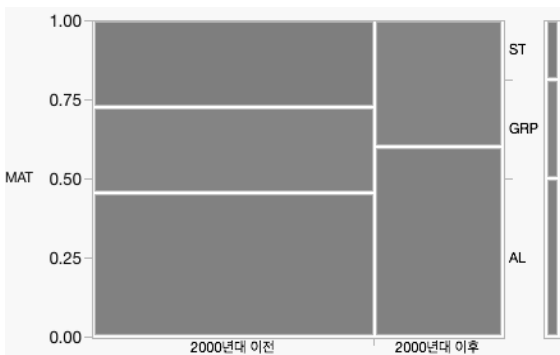


[Figure 6.8] Distribution of Construction year

주무장으로 구경 12.7mm와 20mm급 이상 포를 주로 탑재한다. 추진기의 경우 재래식 프로펠러인 Fixed Pitch Propeller(FPP)와 더불어 최근 연안 고속정에 많이 채용되는 워터젯 추진기를 골고루 탑재하는 것으로도 볼 수 있다. 그러나 시대별 분포를 재확인해본 결과 2000년 이후 건조된 고속경비정 대부분은 워터젯을 탑재하고 있음을 아래 Figure 7을 통해 확인하였다. 선체 재질의 경우 소형 고속정 임을 고려 중량 감소를 위해 복합재질(GRP)이나 알루미늄(AL)을 많이 적용하는 것으로 Figure 8에서 확인할 수 있다. Figure 6.8에서의 건조년도를 살펴보면 기간에 관계없이 활발히 건조되고 있으며



[Figure 7] Distribution of Propulsor in the period

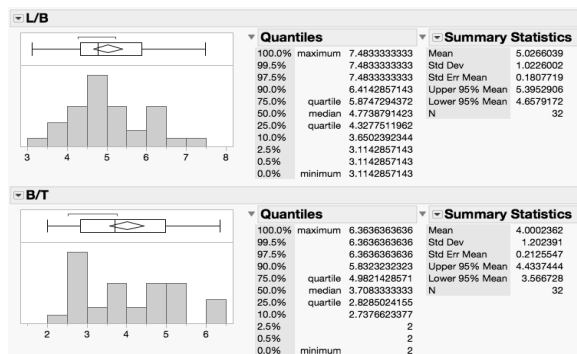


[Figure 8] Distribution of Hull Material in the period

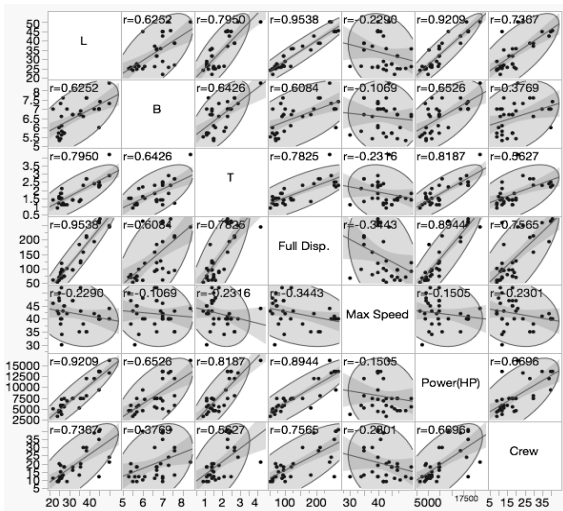
특히 1980년대 중반과 2000년 중반 두드러지게 많은 척수가 건조된 것으로 확인된다. 1980년대에는 주로 중동 및 동구권에서 고속정을 많이 건조하였으며 2000년 중반 이후에는 이스라엘, 일본, 미국 등 서구권에서 고속정을 많이 건조하는 것으로 확인된다.

40노트급 고속선의 경우 대형 전투함에 비해 유체동역학적(Hydrodynamic) 특성이 중요하게 취급된다. 특히, 길이/폭(L/B), 폭/흘수(B/T) 등의 선형 제원비는 저항 감소 및 조종성 측면 조선공학에서 중요하게 다루는 무차원 계수이다. 이에 설계영역 탐색에서는 유사 실적함의 선형계수비 분포 범위를 확인하여 개선 및 통제단계에서 도출된 설계케이스들이 이 범위를 만족하는지에 대해 점검해 볼 필요가 있다. 도출된 선형계수비 분포는 Figure 9로 확인된다. 흘수는 선체중양부가 수면에 닿은 위치에서 선박의 가장 밑바닥 부분까지의 수직거리를 말한다(수면 아래 선체 깊이).

종속변수와 독립변수간의 선형 관계율을 알아보기 위해 다중 상관분석(Correlation analysis)을 적용한다. 상관관계 분석결과는 다양한 정보를 제공하는데 이를 통해 변수들 간의 숨은 관계를 파악하는데 유용하다. 아래 그림은 데이터베이스로부터 식별된 11개의 변수 가운데 연속형 변수인 길이(L), 폭(B), 흘수(T), 만재톤수(Full Disp.), 최대속력(Max Speed), 설치마력(Power (HP)), 승조원수(Crew)간의 상관관계를 분석한 차트이다.



[Figure 9] Distribution of Hull dimension coefficient



[Figure 10] Multivariate Correlation Analysis Chart

연속형 변수 간의 상관 정도는 Figure 10의 각 그래프별 상단에 표시된 상관계수(r)로 파악된다. 상관계수가 0.7 이상일 경우 강한 상관관계, 0.5~0.7일 경우 약한 상관관계, 0.5 이하일 경우 상관관계가 없다. 상관관계 직선이 좌측으로 기울 경우 양의 상관관계, 우측으로 기울 경우 음의 상관관계를 가진다[8]. 이러한 정의에 따라 변수들 간의 상관관계는 아래와 같이 요약된다.

- 길이(L) ~ f(B, T, Full Disp., Power, Crew)
- 폭(B) ~ f(L, T, Full Disp., Power, Crew)
- 흘수(T) ~ f(L, B, Full Disp., Power, Crew)
- 만재톤수(Full Disp.) ~ f(L, B, T, Power, Crew)
- 최대속력(Max speed) ~ Not applicable
- 설치마력(Power) ~ f(L, B, T, Full Disp., Crew)
- 승조원수(Crew) ~ f(L, T, Full Disp., Power)

위 분석결과는 연속형 변수 간의 선형적인 상관관계를 의미하는 것이지 직접적인 인과관계를 말하는 것은 아니다. 다시 말해 통계적 수사인 “상관관계를 가진 변수들 간의 인과관계가 있을지도 모른다”라는 정도로 이해하면 된다. 분석결과는 개념탐색, 개발개념에서의 대안분석 및 공학적 설계과정에서 참고로 활용된다. 함정공학에 익숙하지 않는 비전문가에게는 설명 수단으로 활용할 수 있다.

실제 설계영역탐색 과정에서 가장 중요한 과정이 ‘측정 단계’로 적절한 변수의 선정, 정확한 데이터의 수집과 처리, 분석 결과의 명확한 해석이 함께했을 때 참여자에게 유용한 통찰력을 제공할 수 있다.

3.3.3 분석단계

분석단계는 측정단계에서 정의한 독립변수 중 종속변수에 크게 영향(효과)을 주는 핵심 변수가 무엇인지를 파악하는 것이 목적이다. 이를 위해 통계의 스크리닝이나 분산분석을 적용할 수 있다. 본 연구에서는 정의단계에서의 종속변수인 만재톤수(Full displacement)에 대한 독립변수 6종의 효과를 스크리닝을 통해 분석한다. 만재톤수에 영향을 주는 핵심 독립변수로 승조원수(Crew), 주무장(Weapon), 최대속력(Max speed) 순으로 영향도가 크음을 알 수 있다. 선체재질(MAT)의 경우 부분적인 영향만을 주지만 무시할 수 있는 수준은 아니다.

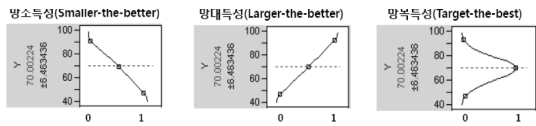
Screening for Full Disp.					
Contrasts					
Term	Contrast	Lenth	Individual t-Ratio	p-Value	Simultaneous p-Value
Crew	57.6134	8.31	8.31	<.0001*	0.0003*
Weapon	27.5553	3.97	3.97	0.0020*	0.0482*
Weapon*Weapon	24.1399 *	3.48	3.48	0.0041*	0.0979
Max Speed	-12.6348	-1.82	-1.82	0.0838	0.8070
Max Speed*MAT	12.0776 *	1.74	1.74	0.0949	0.8568

[Figure 11] Screening for full displacement

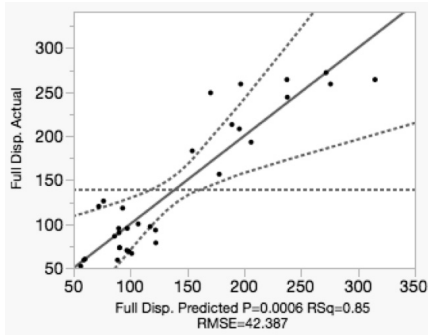
핵심 독립변수는 종속변수인 만재톤수에 분명한 영향을 주는 것으로 대상 고속경비정의 KPP(안)으로 정의할 수 있으며 개념탐색 단계에서의 대안분석시 더 면밀하며 정확한 검토가 필요한 항목으로 취급되어야 한다.

3.3.4 개선단계

개선단계는 회귀분석(Regression analysis) 또는 인공신경망 분석(Artificial neural network analysis)을 통해 종속변수 Y에 대한 통계모형을 개발한다. 모형에서 Y를 망대(Larger-the-better), 망소(Smaller-the-better) 또는 망목화(Target-the-best)하는 최적의 독립변수 X를 도출한다. 최적화에는 만족도 함수(Desirability function)를 적용한다.



[Figure 12] Desirability Functions



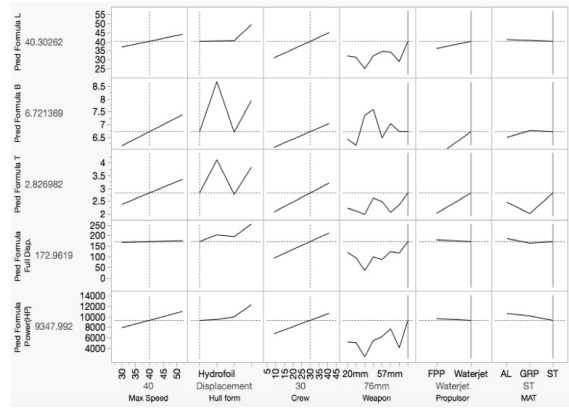
[Figure 13] Comparison between actual value and predicted value

Table 2의 데이터베이스는 결측치(Missing value)가 없어 데이터 품질이 양호하므로 아래 식 (1)의 다중회귀분석(Multiple Regression Analysis)을 이용하여 통계모형을 개발한다. 데이터베이스에 결측치가 많은 경우에는 회귀분석보다는 비선형성을 더 잘 표현하는 인공신경망 분석을 적용하는 것이 유리하다.

$$R = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

여기서, R 은 관심 있는 반응변수(만재톤수), x 는 독립변수, b 은 회귀계수이다. Figure 13에 따르면 종속변수에 대한 통계모형의 설명력을 나타내는 결정계수(Coefficient of determination, R^2)는 0.85로 모형이 종속변수와 독립변수간의 인과관계를 통계적으로 잘 설명한다고 할 수 있다.

모형의 적합도를 시험하기 위해 만재톤수를 200톤으로 망목 설정하여 최적화를 수행해 보았다. 최대속력은 40노트, 선형은 배수량형, 승조원수는 30명, 76mm 주포, 워터젯 추진기, 강철 재질을 적용할 경우 최적의 조합이 될 것이라는 하나의 답을 얻을 수 있었다. 이때 개략 함 크기는 길이 40m, 폭은 6.7m, 흘수는 2.8m이며 최대속력 40노트시 설치



[Figure 14] Optimized prediction profiler

되어야 하는 설치엔진의 총마력은 약 9,347마력이라는 추가 예측치를 얻을 수 있다. 그러나 최적해(Best solution)는 수 많은 답 중 하나를 의미하는 것이지 궁극의 해(Ultimate solution)가 아니라는 점에 따라 얻을 수 있는 무한의 해(Solution) 중 하나로 취급되어야 한다.

개선단계의 목적은 위와 같은 단일의 최적해를 얻는 것이 아니라 Figure 14의 설계옵션(가로축)의 변경(조정)을 통한 복수의 최적 설계조합을 탐색하는 것이다. 함정 설계자(데이터분석자)와 운영 분석자는 앞서 정의단계에서의 초기 개념대안(Table 1)과 모형 최적화 탐색을 통해 개념대안별 핵심성능변수(KPP)(안)를 아래 Table 3과 같이 정의한다. 도출된 핵심성능변수(안)은 설계영역탐색의 마지막 단계인 통제단계에서 설계가능범위 도출을 위한 시뮬레이션시 고정 변수로 활용한다.

<Table 3> Initial Key Performance Parameters for Each Concept Alternative

구분	대안 1	대안 2	대안 3
운용개념	추격 격파	접근 거부	항만 방어
작전범위 (만재톤수)	만재 200톤급	만재 150톤급	만재 100톤급
전 투 성 (주무장)	76mm 포	40mm 포	20mm 포
생존성능 (선체재질)	강철(ST)	알루미늄(AL)	복합재(GRP)

3.3.4 통제단계

통제단계는 개념대안별 설계가능범위를 광범위하게 탐색하여 최초 정성적(능력 관점) 개념대안(Table 1)을 정량적(성능과 기능 관점) 개념대안으로 발전시키는 단계이다. 통계모형을 기반으로 모의난수 발생 알고리즘인 몬테카를로 시뮬레이션을 적용하여 설계케이스를 임의 생성하고 그 분포를 확인하여 개념대안별 설계가능범위를 도출한다. 각 개념대안별 시뮬레이션을 위한 변수 정의는 Table 4와 같다.

주파와 선체재질은 KPP(안)에 따라 개념대안별 고정변수로 설정하였으며, 만재톤수는 망목함수로 최적화토록 하였으며 추진기는 운용환경(저수심 연안에서 주로 운용)을 고려 워터젯 추진기로만 정의하였다. 승조원수는 측정단계 승조원 분포와 국내 실적합 인원편성 개념을 참고하여 ±형으로 설정하였다. 각 대안별로 5,000개의 난수케이스를 생성하여 설계가능범위 분포를 히스토그램으로 확인하였다.

Table 5는 제한조건을 만족하는 개념대안별 설계가능범위 분석결과이다. 대안 1의 만재톤수는 망목치보다 낮으나 최대속력을 만족하지 못할 가능성이 높다. 1안은 타 안 대비 승조원수가 많으며 무거운 재질인 강철재를 적용함으로써 대안 2와 유사한 선체 크기임에도 불구하고 최대속력을 만족하기가 힘들 것으로 예상된다. 대안 3의 경우는 Table 3의 만재톤수 KPP를 초과할 가능성이 높으나 다른 요구조건은 대부분 만족할 것으로 예상된다.

설계가능범위 분석결과는 장기간, 대규모 인원

<Table 4> Design Variables and Constraints for Each Concept Alternative

구분	대안 1	대안 2	대안 3
망목함수	만재 200톤	만재 150톤	만재 100톤
고정변수	76mm 포	40mm 포	20mm 포
	강철(ST)	알루미늄(AL)	복합재(GRP)
	워터젯	워터젯	워터젯
변동변수	40±5노트	35±5노트	30±5노트
	30±5명	20±5명	15±5명
제한조건	L/B = 4.0~6.0, B/T = 2.8~5.2		

투입의 기본설계와 같은 구체적인 공학적 설계 없이도 작전운용성능(안)을 도출하는데 충분한 수준의 정보를 제공할 수 있을 것이다. 다만, 특정 대안이 요구조건을 만족하기 힘들 것으로 예상될 경우 Table 4의 변수 조정과 재시뮬레이션을 통한 미세조정이 요구된다. 예를 들어 대안 1에서 선체재질을 강철재에서 경량의 복합재로 변경할 경우 선형은 활주선형에서 반활주선형, 최대속력은 33노트에서 43노트, 만재톤수는 169톤에서 183톤, 함 길이는 34m에서 42m로 증가되어 최대속력 및 함 크기 등 여러 측면에서의 향상을 얻을 수 있는 것으로 예측된다. 대안 2와 3의 경우도 주무장, 선체재질, 승조원수 등의 미세조정을 통한 향상한 결과를 도출할 수 있다. 이러한 실시간 동적 검토는 초기단계 설계시 필요한 유연성과 신속성을 제공한다는 점에서 효과적이다.

설계가능범위를 포함한 개념대안은 운용요구조건 검토회의(ORR)시 의사결정을 위한 검토안건으로 상정되어지며, 운용자·획득자·개발자·연구자 등 이해관계자로 구성된 회의체를 통해 최적의 ‘개념베이스라인’(하나 또는 둘)으로 수렴된다.

<Table 5> Feasible Design Ranges for Each Concept Alternative

구분	대안 1	대안 2	대안 3
운용개념	추격 격파	접근 거부	항만 방어
선형	활주선형	활주선형/ 반활주선형	반활주선형
만재톤수	151~169톤	79톤~120톤	108톤~129톤
최대속력	28~34노트	30~37노트	29~35노트
승조원수	19~25명	15~22명	13~19명
주무장	76mm 포	40mm 포	20mm 포
추진기	워터젯	워터젯	워터젯
선체재질	강철	알루미늄	복합재
길이	33~35m	29~35m	31~34m
폭	5.8~6.1m	5.6~6.4m	6.4~6.7m
흘수	2.0~2.1m	1.4~2.1m	1.3~1.6m
설치마력	7,385 ~	5,936 ~	5,712 ~
	7,862 HP	7,499 HP	6,618 HP

4. 결 론

현행 한국해군의 초기단계 함정설계 프로세스와 개념베이스라인 도출을 위한 설계영역탐색에 대해 살펴보았다. 초기단계 함정설계 프로세스는 현행 무기체계획득절차에 부응하기 위한 시스템엔지니어링 절차와 도구를 적용하여 모델링되었으며[9], 수년간의 시행착오를 거쳐 안정적인 결과를 도출하는데 유용하다는 점을 확인하였다. 본 설계영역탐색법은 2013년 한국형차기구축함(KDDX), 2015년 울산급 Batch-III 등 최근 수행한 선행연구(개념설계) 시 개념베이스라인 선정을 위한 기술검토를 위해 활용된바 있다. 정보가 충분하지 않은 초기단계에서 점수치가 아닌 범위형 수치로 개념베이스라인별 설계가능범위를 제시함으로써 의사결정 과정에서의 신속성과 효율성을 제고할수 있다. 또한 실제 개념 개발 과정에서의 구체적인 공학설계(합 크기 추정) 결과가 초기 도출된 설계가능영역내에 위치함을 확인함으로써 그 수치적 신뢰성을 아래 Table 6을 통해 확인할수 있다. 함중에 따라 기간의 차이는 있을 수 있으나 대부분의 경우 설계가능영역은 프로젝트 착수후 3개월 이내 원하는 수준의 결과를 도출할 수 있었다.

설계영역탐색은 초기단계 함정설계의 목적과 수준에 부응하는 여러 장점을 가지고 있는 것으로 확인되었다.

- 1) 능력기반 소요기획을 위한 충분한 수준의 설계정보 제공
- 2) 단기간(3개월 내), 소수의 인원(5명 이내)만으로도 효율적 수행 가능

- 3) 요구조건의 빈번한 변경에 신속한 대응 가능
- 4) 최적해 선정에 있어 가시적이며 동적인 의사결정 수단 제공 등

물론 장점에도 불구하고 보완하여야 할 사항도 많다.

- 1) 함중별 설계조합 S/W 개발·적용을 통한 더 풍부한 데이터베이스 구축
 - 결측치, 자료 오류 및 출처 불명 자료가 많은 경우 통계분석 자체의 신뢰성 저하 초래
- 2) 통계분석 및 설계경험을 동시에 보유한 함정 시스템엔지니어 교육 및 양성체계 미흡
 - 좋은 도구만으로 모든 것이 해결될 수는 없음. 사람·절차·도구가 하나가 되는 통합개발기반 구축 필요
- 3) 능력기반 소요기획의 기술적 지원을 위한 강건한 절차와 가이드라인(템플릿 포함) 부재
- 4) 기존의 설계정보만을 참고함으로써 새롭고 창의적인 함정기술 적용 제한 등

차기구축함(KDDX), 차기호위함(FFX Batch-III), 차기일반형고속정(PKX-B Batch-II), 차기항만경비정(YUB-P) 등 최근 우리군 초기단계 함정설계 업무에 논문에서 설명된 설계프로세스와 설계영역탐색이 적용 되었다. 성과도 많았지만 여기에 만족하지 않고 시행착오를 거치며 한국화와 규정화에 전념할 때라 본다. 향후 무기체계획득 프로세스는 진화를 계속할 것이 분명하다. 현재의 성과에 머무를 것이 아니라 함정설계프로세스의 실용적 혁신과 설계영역탐색을 포함한 더 많은 창의 설계기법의 도입도 계속 시도되어야 할 것이다.

<Table 6> Comparison between design space ranges and engineering design results of 0000 project

구분	설계가능영역	공학 설계		최종설계결과
		유체역학적	일반배치	
합같이	X96~Y06m	X88~Y28m	X90~X98m	X98m
합 폭	X4.0~X8.0m	X1.4~X5m	-	X5.3m
합 수	X0.6~X1.0m	-	X1.3~X1.4m	X1.0m

References

1. Myeong Seob Cho et al., 'A Study on the Model-Based Systems Engineering Process for Developing the Naval Combat System,' Journal of the Korea Society of Systems

- Engineering Vol. 8, No. 1, 2012. 6.
2. Nam-pyo Suh. *Axiomatic Design: Advances and Applications*, Oxford University Press, 2001.
3. Kenneth J. Arrow, '*Social Choice and Individual Values*,' Yale University Press, 1996.
4. Iyengar SS(1) and Lepper MR., 'When choice is demotivating: can one desire too much of a good thing?,' 2000 Dec;79(6): 995-1006., J Pers Soc Psychol.
5. Jaewook Baek and Sunghyun Park, 'Six Sigma Management' Korea National Open University Press, January 2006.
6. Sungso Park et al., 'Data Analysis using JMP-SAS guide,' Free Academy, March 2013.
7. IHS Jane's Fighting Ships 2014-2015.
8. Taelim Lee et al., '*Introduction to Statistics*,' Korea National Open University Press, January 2015.
9. Jinwon Park, '*Introduction to Early Naval Ship Systems Engineering*,' Introductory and Practical Course, Defense Acquisition Program Administration, November 2015.