

집합기반설계와 유전자알고리즘을 이용한 초기단계 함정설계 최적화

박진원
한얼솔루션 통합설계실

Optimization of Early-phase Ship Design using Set-Based Design and Genetic Algorithm

Jin-Won Park
Integrated Design Division, Haneol Solution Co., Ltd.

요약 함정설계 시에는 초기 운용요구 능력의 불확실성을 고려하여 무수히 많은 대안 중에서 최적의 무장시스템과 플랫폼의 제원을 선정하기 위해서는 시스템적인 접근 방법이 필수적이다. 미 해군은 초기단계 설계 시 최적 설계조합을 시행착오 없이 효율적으로 선정하기 위하여 집합기반 설계를 차기 공기부양정 초기단계 설계에 성공적으로 적용한 바 있다. 집합기반 설계를 적용하기 위해서는 설계조합에 필수적인 모델인 함정통합모델이 필수적이거나 아쉽게 현재 실질적인 함정통합모델을 보유하고 있는 국가는 미국, 영국 정도의 극히 일부 국가이며 관련된 기술의 타국으로의 이전도 전혀 허용하지 않고 있다. 본 연구에서는 기존 함정설계 데이터의 벤치마킹을 통해서도 미국을 중심으로 선진화된 최신 설계 기법인 집합기반설계가 가능할 수 있도록 유전자알고리즘과 의사결정 방법론인 TOPSIS를 통합한 우리나라의 여건과 역량을 고려한 한국형 집합기반 설계 프로세스를 구축하였으며 현재 연구 및 교육 목적으로 일반에 공개된 DDG-51급 통합함정모델을 이용하여 함정의 무장시스템 초기단계 설계 최적화에 적용하여 제안된 한국형 집합기반설계의 적용 가능성을 검증하였다.

Abstract The system-based approach is needed to select an optimal mix of weapon systems and ship platform among a variety of design alternatives with the uncertainties of the initial required operational capability. In the early-phase design, which included a feasibility study and concept design, it is possible to cause problems when a review of the operational concept, database development, and systematic design are not done, thereby producing uncertain and unstable requirements. To select the best solution without trial-and-error, the U.S. navy has applied the set-based method for the early-phase design of a new ship-to-shore connector. The ship synthesis model plays an important role in applying the set-based method, but only a few countries possess this model and have prohibited this model from being transferred to other countries. This paper suggests a set-based method using a genetic algorithm and decision-making theory through benchmarking existing ship data. The algorithm was verified using the DDG-51 class ship synthesis model to optimize the weapon system design, which has been released for research purposes.

Keywords : Set-Based Design, TOPSIS, DDG-51, Ship Synthesis Model, Genetic Algorithm, Virginia Tech

*Corresponding Author : Jin-Won Park(Haneol Solution Co., Ltd.)

email: jwpark1@gmail.com

Received August 12, 2019

Accepted October 4, 2019

Revised September 6, 2019

Published October 31, 2019

1. 서론

함정획득사업에서 발생하고 있는 대부분의 문제는 주로 획득의 초기단계, 즉 작전운용능력(ROC: Required Operational Capability, 이하 ROC)을 초기단계 설계에서 충분히 검토하지 못해 발생한다고 해도 과언이 아니다. 건조가능성검토와 개념설계 단계에서 선체 및 탑재 체계에 대한 구체화된 운용개념 검토, 데이터베이스 개발 및 시스템적인 설계가 제대로 이루어지지 않아 불확실하며 불안정한 ROC, 함정건조기본지침서(TLR: Top Level Requirement, 이하 TLR)를 작성하고 있기 때문이다. 불확실성과 불안정성은 시간이 갈수록 문제와 위협으로 변환되는 속성을 가지고 있다. 해결 가능한 초기단계 설계를 위해서는 빠른 기간 내 가능한 많은 수의 최적 대안을 도출하여 제안된 ROC(안)이 타당한지를 신속하게 검토하고, 타당하지 않다면 그것을 미련 없이 변경해야 한다. 실질적인 예산과 인력이 투입되는 후반기 설계에서의 시행착오를 줄여 적기 사업 완료의 열쇠이기 때문이다.

우리의 경우 본질적으로 충분하지 않은 정보를 가질 수밖에 없는 초기단계 설계임에도 불구하고 단일 또는 2~3개의 기존 실적데이터만을 이용한 제한적 참고설계(parent ship design)를 수행하고 있다. 참고설계에 내재된 변동성과 불확실성으로 동일한 문제가 반복되고 있다. 미해군은 이런 초기단계 설계에 내재된 불확실성과 불안정성 해소를 위해 집합기반설계(SBD: Set-Based Design, 이하 SBD)를 개발, 실제 함정설계에 적용하고 있다.

본 연구에서는 함정통합모델(SSM: Ship Synthesis Model, 이하 SSM)뿐만 아니라 기존 함정 데이터의 벤치마킹을 통해 집합기반설계가 가능하도록 유전 알고리즘과 의사결정 방법론인 TOPSIS(technique for order preference by similarity to ideal solution)를 통합한 한국형 SBD 프로세스를 구축하였으며 연구목적으로 공개된 DDG-51급(Arleigh Burke-class destroyer) SSM을 무장시스템 초기단계설계 최적화에 적용하여 제안된 한국형 SBD의 타당성을 입증한다. 본 논문에서는 통계분석 및 시각화에 뛰어난 통계패키지 JMP를 사용하여 SBD를 구현하였다.

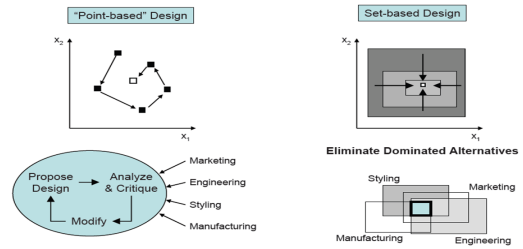


Fig. 1. Comparison of point-based design and set-based design[1]

2. 집합기반설계

단일 대안을 기준으로 설계를 점진적으로 구체화해가는 점기반설계(PBD: Point Based Design, 이하 PBD)는 관련 기술과 장비가 충분히 성숙하여 대안의 불확실성이 적다는 가정하에서는 유용하다. 그 때문에 기본설계와 상세설계에 널리 사용되고 있다. 하지만 함정의 초기 ROC는 사전 장기계획(10~15년 전)을 위한 개략 요구조건이라는 점과 무장시스템과 함정 제원의 대안도 무수히 많이 존재할 수 있기 때문에 하나의 대안만을 확정하는 PBD가 적합하지 않다. 현재의 기술 수준만을 고려한다면 10년 후 진부화될 것이고, 10년 후를 미리 예상하여 과감한 대안을 선정한다면 불확실성을 자초하게 된다. 미해군에서는 이런 불확실성을 고려하기 위해 Fig. 1과 같은 SBD를 함정 초기단계 설계에 적용하고자 많은 노력과 투자를 기울여왔다. SBD를 구현하기 위해서는 전산 환경 기반의 SSM이 필수적이다. 빠른 시간내에 대안도 출과 분석이 필요하기 때문이다. 미국의 경우 함정 개념설계를 위한 ASSET (Advanced Ship Synthesis Evaluation Tool)을 1970년대 개발하여 현재에 이르고 있으며, 영국의 경우 1990년대부터 Paramarine이라는 SSM을 보유하고 있다. 미국과 영국의 경우 1차 세계대전 이전부터 함정설계 역량을 갖추고 점진적으로 발전시켜 왔기에 축적된 데이터를 기반으로 가능했다고 평가된다. 반면 우리나라 함정설계의 경우 1970년대 미국의 기술지원 하에 시작되어 2000년대 초반에 이르러서야 독자적인 설계역량을 갖추기 시작했기 때문에 미영과 같은 SSM을 개발할 여건이 미성숙했으며 의지와 노력도 부족했던 것이 사실이다.

2.1 한국형 집합기반설계

미 해군의 SSC 초기단계 설계에 적용된 SBD 설계는 Fig. 2와 같이 상쇄공간 설정(trade space setup), 상쇄공간 분석/수렴(trade space analysis/reduction), 통합/평가(integration/scoring)의 3가지 프로세스로 구성된다. 하위항목은 모두 19가지 스텝으로 구성되어 있다[2]. 하지만 19가지 스텝은 우리 해군의 획득환경과는 확연히 다른 미 해군의 함정설계 환경과 프로세스를 기반으로 하고 있으므로 우리의 함정 초기단계 설계에 직접 적용할 수는 없다.

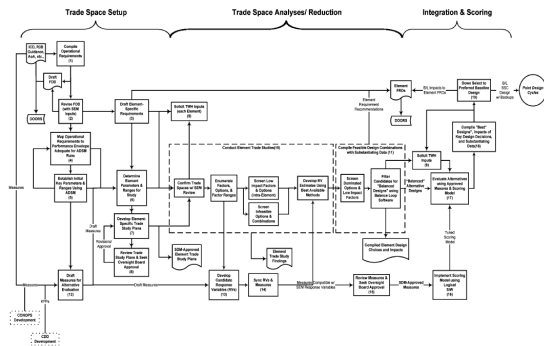


Fig. 2. Set-based design process diagram for the early-phase of the ship-to-shore connect[2]

대신 본 연구에서는 함정 초기단계설계에 적용되고 있는 시스템적인 방법론으로 미국 버지니아공대에서 제안한 Fig. 3 개념 및 요구조건 탐색(C&RE: concept and requirements exploration, 이하 C&RE) 프로세스를 기반으로 우리 실정에 적합한 SBD를 제안한다. C&RE는 초기단계 설계 시 PBD 기반의 수작업 설계가 아니라

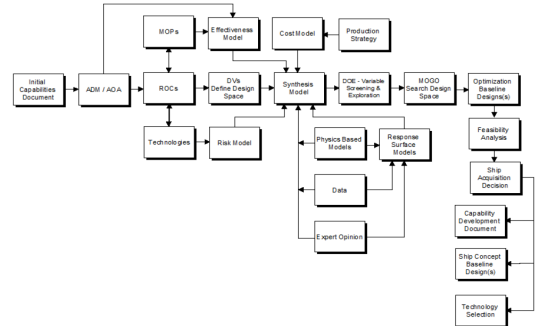


Fig. 3. Concept and requirements exploration process[3]

컴퓨터를 이용한 SSM을 이용한다. 최적화 목표함수는 효과도, 위험도, 획득비용 등 3가지로 다목적 유전 알고리즘을 적용하여 파레토 집합을 얻는다[3].

본 연구에서는 SBD를 적용하기 위한 명확한 목적함수와 제한조건을 도출하는 프로세스는 버지니아공대에서 제안한 C&RE 프로세스를 벤치마킹하고 상위수준 프로세스는 SSC에 적용된 SBD 프로세스와 순차적 근사 최적화 프로세스를 벤치마킹하여 한국형 SBD 프로세스를 Fig. 4와 같이 구축하였다. 한국형 SBD 프로세스의 특징은 현재 미국의 ASSET이나 영국의 Paramarine과 같은 종합 SSM이 없는 우리 현실을 고려하여 SSM이 있는 경우와 없는 경우를 모두 고려할 수 있도록 구축하였으며 SSM이 없는 경우에는 유사함정 데이터베이스를 벤치마킹하여 SBD가 가능하도록 구축하였다. Fig. 4의 ①은 SSM이 있는 경우의 프로세스를 의미하며 본 연구에서 적용한 DDG-51급 SSM에 적용한 무장 시스템 최적화와 동일하다. ②는 SSM이 없는 경우의 프로세스를 의미하며 유사 실적 함정 데이터를 벤치마킹하여 근사 SSM을

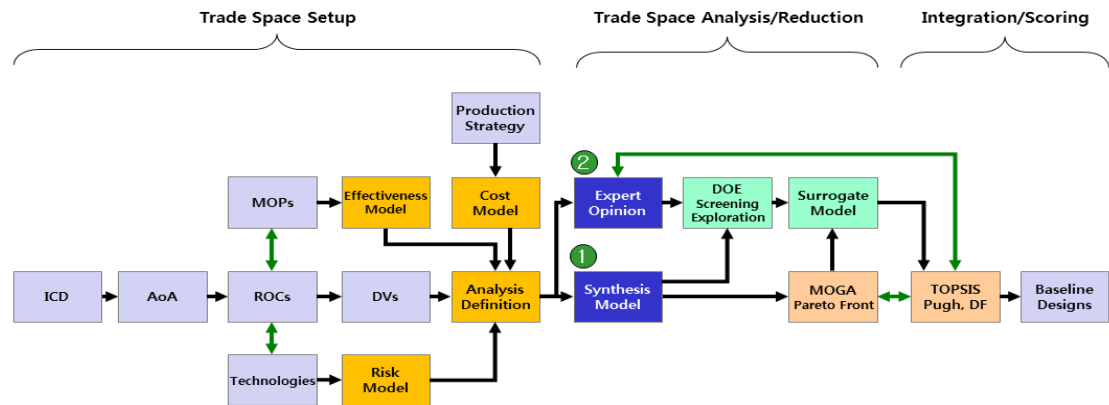


Fig. 4. Proposed set based design

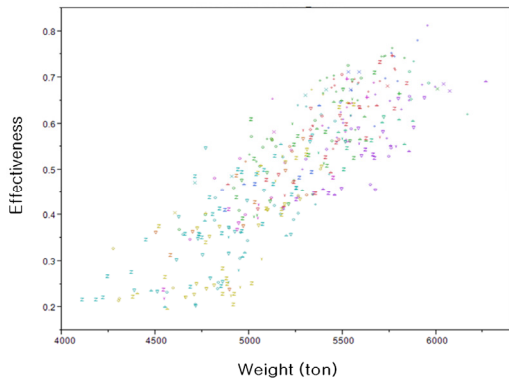


Fig. 7. Pareto set generated from synthesis model

본 연구에서 사용한 MOGA는 유전알고리즘이 가지고 있는 가장 큰 특징인 군(population)을 이용한 탐색방법을 활용하는 것으로 최적 대안 간의 우선순위를 부여하는 파레토 지배(Pareto-dominance) 개념을 이용하여, 여러 가지 다양한 목적함수 간에 존재하는 상호관계를 충분히 반영한 파레토 최적해를 찾아 나가는 방법의 하나다. MOGA 역시 수많은 종류가 알려졌지만, 일반적으로 가장 널리 활용되고 있는 Fenseca이 개발한 방법론을 적용한다[5].

Fig. 7의 가로축은 경하배수량(Wls: light displacement), 세로축은 효과도(OMOE: overall measure of effectiveness)를 나타내며 대공전(AAW: anti-air warfare) 10가지 대안과 대함전(ASUW: anti-surface warfare) 9가지 대안을 색으로 구분하여 2차원 그래프에 표현하였다. 파레토 집합의 장점은 주어진 목적함수의 가중치를 정의하지 않고 주어진 제한조건을 만족하는 모든 해들의 집합이기 때문에, 설계자는 현재 주어진 전장 시나리오 혹은 ROC의 가중치를 자유롭게 변경하면서 최적 대안들을 선정해 줄 수 있다는 점이다. 단점은 가중치를 선정하지 않기 때문에 파레토 집합을 찾는 과정에서 시간이 오래 걸린다는 점이다. 하지만 파레토 집합을 사용하면 원하는 가중치에 따라 최적 대안의 초기 제원을 검토하고 결과가 원하는 ROC를 만족하지 않는다면, 가중치를 변경하여 만족하는 최적대안을 다시 검토하는 순차적이고 시스템적인 접근 방법을 적용할 수 있으므로 초기단계 설계방법으로 적합하다.

SBD로 얻은 총 377가지의 최적 대안 중 주어진 초기 능력서 혹은 ROC를 만족하도록 경하배수량(Wls)을 5,600톤 이하로 제한하고 효과도(OMOE)를 0.7 이상으로 제한한 경우 총 377가지 대안 중에서 6가지 최적대안

을 Fig. 8과 전문가 컨퍼런스를 통해 선정하여 Table 1로 정리하였다. 377개 대안 중 주어진 ROC를 만족하는 최적대안은 89, 122, 123, 152, 262, 281번째 대안이 선정되었다. Table 1에 6가지 최적 대안의 순항거리(Emin), 최대속력(Vsmin), 순항속력(Ve), 경하배수량(Wls), 만재배수량(Wt), 효과도(MOE) 값을 정리하였다. 순항거리는 4,400~5,500마일, 최대속력은 30~31노트, 순항속력은 20~21노트, 경하배수량은 5,400~5,600톤, 만재배수량은 7,200~8,200톤, 효과도는 0.70~0.73의 범위를 갖는다. 경하배수량은 5,600톤 이하로 주어진 ROC를 만족한다는 것을 알 수 있다.

Table 1. Optimal solutions generated from Pareto set

No.	Emin	Vsmin	Ve	Wls	Wt	OMOE
89	5,477	30.15	20.85	5,531	7,608	0.71
122	5,106	30.17	20.00	5,498	8,180	0.71
123	5,328	30.16	21.01	5,586	7,768	0.71
152	5,448	30.42	20.91	5,532	7,375	0.73
262	4,424	30.84	21.06	5,451	7,201	0.71
281	5,049	30.85	21.11	5,415	7,244	0.70

SBD의 분석 기법 중에서 유용하게 사용되는 기법 중의 하나가 Fig. 9에 표현한 병렬플롯(parallel plot)이다. 병렬 플롯은 관심이 있는 설계변수와 응답의 조합이 전체 조합에서 어디에 속해있는지를 한눈에 보여준다.

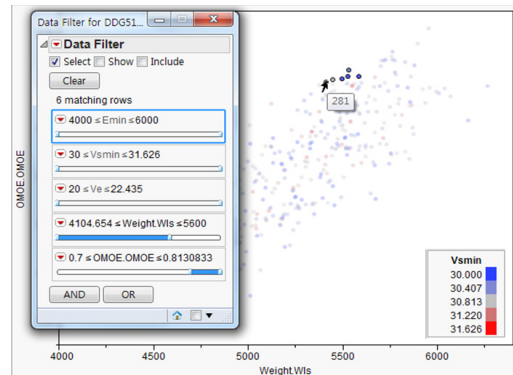


Fig. 8. Optimal solutions generated from Pareto set

경하배수량을 5,600톤 이하로 제한하고 효과도를 0.7 이상으로 제한했기 때문에 경하배수량과 효과도는 좁은 특정 범위 안에서 선정되었다. 9가지 무장 시스템도 최소 2가지에서 최대 3가지 대안 사이의 좁혀진 범위에서 선정되었다(굵은 선).

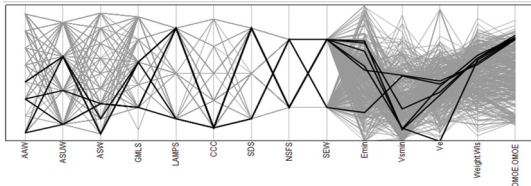


Fig. 9. Parallel plot of optimal solutions generated from Pareto set

SBD를 적용함으로써 무장시스템의 초기 많은 대안들이 점차 줄어들면서 최소 2가지에서 최대 3가지 대안으로 좁혀졌다는 것을 의미한다. 즉 설계자는 파레토 플롯과 병렬 플롯을 같이 적용하여 1차적으로 선정된(선별된) 최적 대안 중에서 주어진 ROC의 제한조건을 만족하는 최적 대안을 선정하였다.

3.2 TOPSIS 기반 최적화

MOGA를 적용하여 도출된 총 377가지의 최적 대안 중에서 ROC의 제한조건을 고려하여 총 6가지의 최적 대안을 도출하였다. 도출된 최적 대안의 우선순위를 선정하기 위하여 이상적인 해의 거리(D+)와 반이상적인 해의 거리(D-) 개념을 적용한 TOPSIS 의사결정 방법을 적용한다. TOPSIS 의사결정 방법은 Fig. 10과 같이 이상적인 해(S+)에 가장 가까우며 반이상적인 해(S-)로부터 가장 먼 대안을 선택하는 의사결정 방법이다[9,10]. TOPSIS에서 최선의 대안은 이상적인 해로부터 거리가 가장 가까워야 하며, 또한 반이상적인 해로부터는 거리가 가장 멀어야 한다. 즉, 대안을 이상적 해의 거리와 반이상적 해의 거리로 변환하여 상대적인 근접 대안을 최적으로 선정하는 것이 TOPSIS 알고리즘이다. 특히 TOPSIS 방법을 적용하기 위해서는 선정된 목적함수 간의 가중치를 먼저 선정해 주어야 하며 전문가들의 정성적인 의견을 정량적인 값으로 변환할 수 있는 AHP(analytic hierarchy process)법을 일반적으로 적용하고 있다[6].

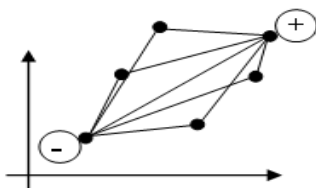


Fig. 10. Concept of Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

최적대안을 도출하기 위한 목적함수는 순항거리(Emin), 최대속력(Vsmin), 순항속력(Ve), 경하배수량(Wls), 만재배수량(Wt), 효과도(OMOE)를 선정하였으며 각각의 가중치는 전문가 설문조사를 거쳐 AHP로 Fig. 11과 같이 얻었다.

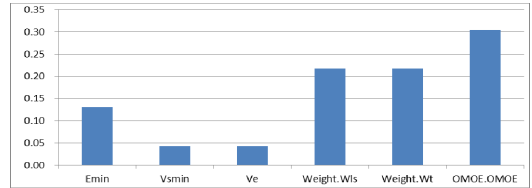


Fig. 11. AHP weight for TOPSIS decision-making

AHP 분석 결과 효과도 > 배수량 > 순항거리 > 속도 순으로 가중치가 선정되었다. 파레토 플롯을 통하여 선정된 6가지 최적 대안에 가중치를 고려하여 TOPSIS 분석 결과는 Fig. 12와 같다. 최적 대안은 152 > 89 > 123 > 122 > 281 > 262 순서로 선정되었다.

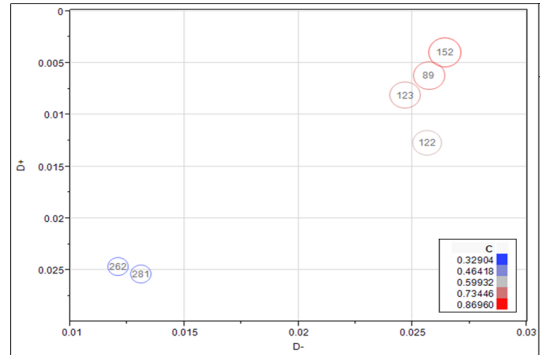


Fig. 12. TOPSIS results for ship preliminary design

본 논문에서 제안한 한국형 SBD 프로세스는 복수대안을 빠른 시간내 생성할 수 있는 유전 알고리즘과 정량적 의사결정방법인 TOPSIS를 적용함으로써 초기단계 설계의 효율성을 제고할 수 있을 것이다. 기존의 PBD에 비해 손쉽고 빠른 의사결정이 가능하다는 것이다. PBD가 하나의 대안을 생성하는데 최소 2주 이상이 걸리는 반면 SBD는 문제의 복잡성과 크기 등에 따라 수시간에서 수일 정도밖에 소요하지 않기 때문이다. 제안한 프로세스에 대해서 분석결과와 고찰과 의사결정 참여 경험을 가진 전문가와의 인터뷰 및 토의를 통해 다음과 같은 장단점을 도출할 수 있었다.

Table 2. Pros and cons of proposed Korean SBD process

Pros	<ul style="list-style-type: none"> - Allow easier decision making with an aid of engineering support. - Feel comfort with visual analytics (e.g., figures, tables, relationships) - Provide re-usability and flexibility of summarized data
Cons	<ul style="list-style-type: none"> - Need much efforts to build reliable SSM - Contain randomness within the set of design candidates

특히 공학적 분석결과를 토대로 한 시각적 설계 후보군(design candidates)의 제시는 공학적 지식이 없는 의사결정자라 하더라도 부담 없이 접근할 수 있다는 점이 가장 큰 장점이다. 다만 개별 SSM 개발에 상당한 노력과 투자가 필요하며, 초기단계 설계의 특성상 확정적인 최적해가 아닌 최적해가 될 수 있을 것이라는 확률론적인 이해가 필요하다는 점을 고려하여야 할 것이다.

4. 결론

불확실한 운용개념, 데이터베이스 부재 그리고 시스템적인 불확실성 등은 함정 초기단계 설계 시 불완전성의 원인 중 하나다. 근본적 문제점을 극복하기 위한 한국형 SBD 프로세스를 미 해군의 SSC 초기단계 설계에 성공적으로 적용된 SBD 프로세스와 버지니아공대의 C&RE 프로세스를 벤치마킹하고 각각의 장점을 추출하였다. 우선 알고리즘과 TOPSIS 의사 결정법 그리고 순차적 최적화 방법론을 통합하여 DDG-51급 무장시스템 최적화에 적용하여 프로세스의 타당성을 검증하였다.

DDG-51급 함정의 무장시스템 최적화에 한국형 SBD를 적용한 결과 경하배수량을 5,600톤 이하로 제한하고 효과도 OMOE를 0.7 이상으로 제한한 ROC를 만족하는 설계대안 총 377가지 중에서도 6가지 최적대안을 최종 선정할 수 있었으며, 의사결정 이론인 TOPSIS를 적용하여 6가지 최적 대안의 우선순위를 정할 수 있었다. 실제 미 해군의 DDG-51급 함정의 경하배수량은 5,400에서 5,600톤 범위에 존재하기 때문에 본 연구에서 얻은 최대 경하배수량 5,600톤 이하를 만족하는 무장시스템 조합은 실질적으로 구현 가능한 대안이라고 할 수 있다.

References

- [1] D.J. Singer, N. Doerry, and M.E. Buckley, "What is Set-Based Design?," *Naval Engineering Journal*, 121(4), pp.1-13, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2009.00226.x>
- [2] L. Walter et. al, "Set-Based Design and the Ship to Shore Connector," *Naval Engineering Journal*, 123(3), pp. 79-92, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2011.00332.x>
- [3] A.J. Brown, J. Salcedo, "Multiple Objective Optimization in Naval Ship Design," *Naval Engineers Journal*, 115(4), pp. 49-61, 2003
DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2003.tb00242.x>
- [4] L. Snyder et. al., "AREA DEFENSE FRIGATE. *ADF Design 95*," Design report, Virginia Polytechnic Institute and State University, U.S.A, 2007.
- [5] I. Mahdavi et. al., "Designing a Model of Fuzzy TOPSIS in Multiple Criteria Decision Making," *Applied Mathematics and Computation*, 206, pp.607-617, 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.05.047>
- [6] N.D. Chakladar and S. Charaborty, "A Combined TOPSIS-AHP-method-based approach for non-traditional machining process selection," *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol.222, No.12, pp.1613-1623, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1238>

박진원(Jin-Won Park)

[정회원]



- 2003년 2월 : 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (공학석사)
- 2008년 9월 : 미국 Virginia Tech 항공해양공학과 (공학박사)
- 2009년 12월 ~ 2011년 12월 : 국방과학연구소 파견 연구원
- 2016년 6월 ~ 2018년 11월 : 방위사업청 시스템공학 담당
- 2019년 9월 ~ 현재 : 한일솔루션 통합설계실 수석연구원

<관심분야>

시스템공학 분석(SE Analysis), Data Science, Concept Design, Set-Based Design, Design Optimization