

네거티브 설계 개념을 이용한 함정 설계영역탐색법 개발

박진원
한얼솔루션 통합설계실

Development of Design Space Exploration for Warship using the Concept of Negative Design

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

요약 예술에서 네거티브 공간은 관심 있는 피사체 주위 공간과 여러 피사체 사이의 공간으로 정의된다. 네거티브 공간은 때로는 이미지의 "실질적" 주제로서 예술적 효과에 사용되기 때문에 예술적 구성요소 중 하나이다. 회화에서는 표현하고자 하는 사물의 배경을 음각으로 터치하는 화법으로 필요한 부분은 남기고 불필요한 부분을 터치하여 독특한 질감과 실루엣의 느낌을 주는 회화기법을 말한다. 예술에서 그것의 개념처럼 설계에서 네거티브 공간은 기술적으로 실행하기 어려운 설계범위를 직관적으로 파악하는데 유용할 수 있다. 두 영역 간의 유사성은 설계영역탐색에 네거티브 개념의 도입을 이끌었다. 통계분석과 시각화분석을 도구로 하는 설계영역탐색은 더 효율적인 의사결정을 지원하고 초기단계 시스템 설계의 방향에 대한 의미 있는 통찰력을 제공할 수 있다. 복잡하고 많은 양의 데이터를 요약한 시각화된 정보는 인간의 인지시스템과 동적인 상호작용을 보장하기 때문이다. 기술적으로 실행할 수 없거나 위험성이 높은 설계공간을 피할 수 있을 뿐만 아니라 실행 가능한 설계공간을 정의하는 데 유용하다. 논문에서 적용 예를 통해 네거티브 설계 개념 기반 설계영역탐색법의 활용 가능성을 살펴본다.

Abstract Negative space in the discipline of art defines the space around and between the subject of an image. The use of negative space is an element of artistic composition, since it is occasionally used to artistic effect as the "real" subject of an image. In painting, it is a technique that negatively touches the background of an object to be expressed, so that it gives a feeling of unique texture and silhouette by touching unnecessary parts while leaving necessary parts. As in art, negative space in a design can also be useful to identify an image of infeasible design ranges with a straightforward view. Similarity between two disciplines leads to the introduction of the negative space concept for design space exploration. A rough design space exploration using statistics and visual analytics may support more efficient decision-making, and can provide meaningful insights into the direction of early-phase system design. For this, the approach guarantees dynamic interactions between visualized information and human cognitive systems. Visual analytics is useful to summarize complex and large-scale data. It is useful for identifying feasible design spaces, as well as for avoiding infeasible spaces or highly risky spaces. This paper investigates the possible use of the negative space concept by using an application example.

Keywords : Negative Design, Design Space Exploration, Early-phase Design, Ship Design, JMP

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

email: jwpark1@gmail.com

Received August 12, 2019

Accepted September 6, 2019

Revised September 5, 2019

Published September 30, 2019

1. 서론

함정설계는 전 분야 균형설계(balanced design)라는 도전적인 목표가 부여되는 공학설계 분야 중 하나다. Fig. 1과 같이 설계가 진행됨에 따라 점진적으로 정도(fidelity)가 높아지는 특성을 띠고 있어 단계별로 명확한 설계범위와 구체화 수준의 정의가 중요하다.

민간의 사업타당성 분석과 동일한 건조가능성검토(feasibility study)는 개략적인 선형, 제원, 최대속력, 주요 탑재장비 등을 결정하는 '요구조건 개발'이 목적이다. '획득할지 말지?'와 같은 사업상의 중요한 의사결정을 시의적절하게 지원하기 위해 요구조건 문서에 담겨야 할 개략적인 기술검토를 단기간 내 신속히 수행해야 한다.

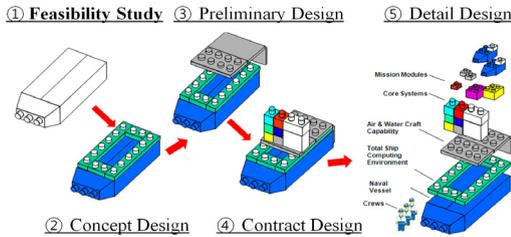


Fig. 1. Evolutionary nature of naval ship design

미국의 경우는 시스템공학(systems engineering)을 골격으로 하여 대안분석(analysis of alternatives)의 중심으로 하부시스템 수준의 다양한 대안분석과 전체로의 최적조합을 광범위하게 탐색하는 절차를 따른다. '운영개념-기능분석-하부시스템 대안분석-설계조합-최적화'라는 일련의 강건한 절차를 통해 비용 효과적인 대안을 전체 설계영역에 대해 탐색하는 방식이다[1]. 최근에는 일련의 설계과정을 통계분석, 시각화분석 등의 다양한 기법(또는 도구)과 조합하여 짧은 시간 내(수일 이내) 새로운 설계조합과 과학적 분석이 동시에 가능한 수준에 이르고 있다[2]. 반면 국내에는 여전히 건조가능성검토 관련 연구에 대한 투자나 관심이 부족하다고 본다. 조선공학 교육과정에 건조가능성 검토 수준의 교육내용이 포함되어 있지 않으며, 실제 관련된 연구논문이나 공개 보고서도 찾기 어렵다. 설계방법이나 도구에 있어 1990년대에 비해 어떤 도약이 있었나 의문이 따른다. 실제 각각의 분야별 분석 S/W는 있으나 설계조합과 분석을 하여 의사결정을 지원할 수 있는 시스템 수준의 설계조합모델(ship synthesis model)의 개발과 적용은 아직 구상단계에만 머무르고 있다.

기존 건조가능성검토는 단일기준(single baseline)을 토대로 거기에 일부 수정하는 과거 방식을 고수하고 있다. 이 경우 애초부터 창의적 접근이 어려워 성능과 외형이 다른 다양한 복수대안을 생성하는 것이 제한되는 문제가 있다. 또한 전 수명주기, 통합 시스템 관점의 검토가 아니라 조선공학에 주로 의존하는 플랫폼 중심 설계로 기간이 경과함에 따른 추가검토와 수정소요가 빈번하게 발생하는 형편이다. 무엇보다 더 큰 문제는 수행시기, 설계자 또는 관리자에 따라 그 검토범위와 수준이 천차만별이라는 점이다. 본 연구는 이런 기존 건조가능성검토의 한계를 극복할 수 있는 새로운 건조가능성검토 방법론을 제시하는 것을 목적으로 하였다. 궁극적으로 더 짧은 시간 내 다양한 복수의 설계대안을 생성할 수 있는 강건한(robust) 절차와 방법을 제안하고자 하는 것이다.

건조가능성검토 기간은 보통 3개월 이내로 시간 제약이 크다. 때에 따라서는 1~2주 이내 승부를 보아야 하는 경우도 흔하다. "조급하다 하여 바늘허리에 실 매어 쓰지 못한다."라고 했듯 무조건 단순화나 신속성만을 추구할 수도 없다. 반대로 공학적(현란한) 정교함을 추구하다 필요시기를 놓치는 우를 범해서도 안 된다. 사전적으로 '단순함'은 "복잡하지 않은 것"이며, '정교함'은 "큰 노력을 들여 완성도를 이루는 것"이다. 단순하며 동시에 정교함을 추구하기 위해서는 수많은 검토와 끊임없는 의심, 그리고 체계적 분석 프로세스를 통해서만이 궁극의 '단순함'에 이를 것이다. 단순함을 추구하기 위해서는 결국 무엇이 중요한지 무엇이 불필요한지에 대한 깊이 있는 고민이 필요하다는 것이다.

본 논문은 설계의 첫 출발인 건조가능성검토의 목적에 부합하는 구체화 수준과 범위의 설계영역탐색법을 제안하는 것이 목적이다. 네거티브 설계개념에 기반한 설계영역탐색의 적용이다. 개념설계-기본설계-상세설계에서 필요한 구체화 수준과 설계범위, 더불어 효율성과 정확성을 보장하기 위한 방법론에 대해서는 향후 별도의 추가연구가 필요할 것이다.

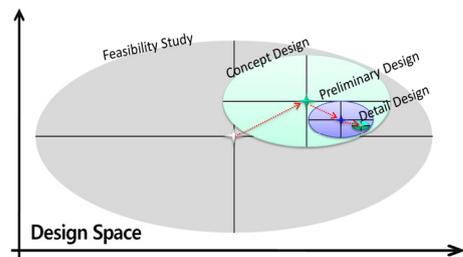


Fig. 2. Concept of design space exploration: narrower, deeper

3.2 개념영역 탐색

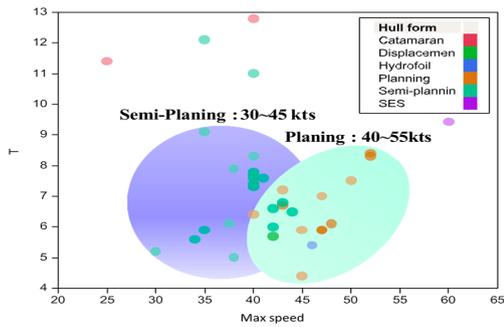
3.2.1 선형 대안(hull-form alternatives) 분석

선형 대안분석을 위해 3.1절에서 정의한 데이터베이스를 이용한다. Fig. 6과 같이 가로축은 최대속력(max speed), 세로축은 무차원수인 수송계수(TF: Transport Factor, 이하 TF)로 하는 2차원 버블 그래프, 가로축은 선형(hull-form), 세로축은 최대속력으로 하는 2차원 변산 그래프를 구한다. 수송계수는 속력, 배수량, 엔진마력을 함수로 하는 무차원수로 해당 선박의 수송능력을 말한다[5].

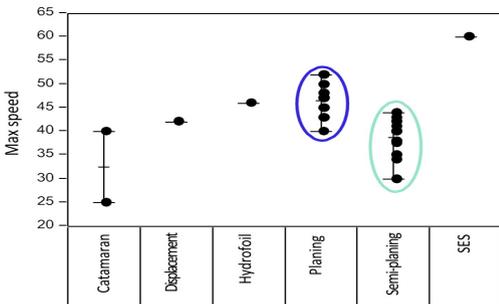
$$TF = K \frac{V \cdot \Delta}{SHP} \quad (1)$$

여기서 K 는 무차원 상수(0.003)이며, V 는 순항속력(또는 최대속력), Δ 는 톤수 그리고 SHP 는 엔진마력이다.

Fig. 6을 통해 반활주(semi-planing) 선형 선택 시 최대속력 가능 범위는 30~45노트급이며, 활주형(planing) 선형 선택 시에는 40~55노트급의 고속정 설계가 가능할 것이라고 추정 할 수 있다. 그래프가 스스로 말해준다고 할 수 있다.



(a) Bubble chart



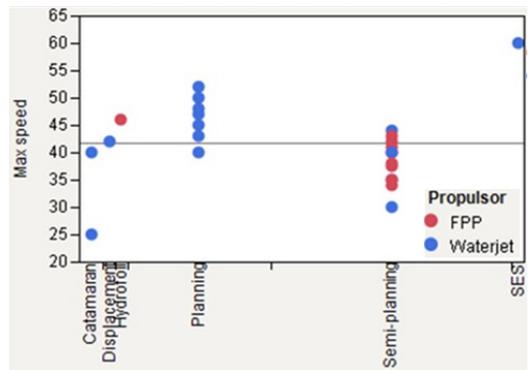
(b) Variability chart

Fig. 6. Analysis result of hull-form alternatives

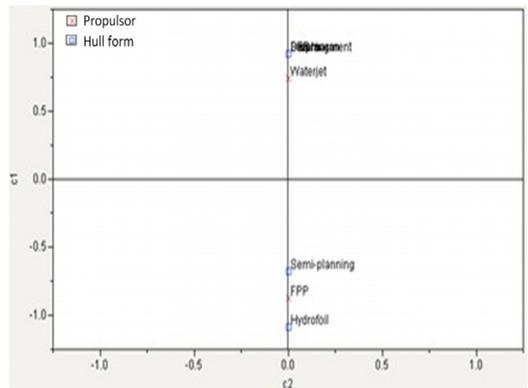
동일 속력에서 TF가 크다는 말은 동일 마력 대비 고속 수송력을 가진 선형이라는 것을 말한다. 30~50 노트급 대부분이 활주나 반활주 선형임을 고려할 때 유사한 범위의 TF(약 5~9)값을 가짐을 알 수 있다.

3.2.2 추진기 대안(propulsor alternatives) 분석

선형대안 분석으로 선형대안 2개(활주, 반활주)를 선정하였다. 다음은 두 선형에 적용 가능한 추진기 대안을 분석한다. 데이터베이스 상의 항목인 선형과 추진기, 그리고 연속데이터인 최대속력을 요인으로 선택하여 Fig. 8의 분석결과를 얻었다. 상단의 그래프는 범주형 변수에 대한 연속형 변수의 분포를 설명하는 일원분석(one-way analysis) 결과이며, 하단은 유사성분석(correspondence analysis) 결과로 유사한 특성을 지닌 추진기 대안의 묶음 분포를 설명한다[4].



(a) Oneway analysis: categorical vs. continuous



(b) Correspondence analysis

Fig. 7. Analysis result of propulsor alternatives

반활주선형의 경우에는 워터젯과 고정피치프로펠러(FPP: Fixed Pitch Propellor, 이하 FPP)를 모두 적용

할 수 있다. FPP의 경우에는 반활주와 수중익선형(hydrofoil)에 적용 가능하며, 워터젯추진기 경우 수중익선형을 제외한 대부분의 고속 선형에 적용할 수 있을 것이라는 추가 설계정보를 얻었다. 추진기 대안 분석은 선형 대안 분석에서 도출한 대안에 적용 가능한 추진기 대안을 검토한다. 특히 설계의 출발점인 건조가능성검토 단계에서 선형 대안과 선형별 적용 가능한 추진기 대안에 대한 사전 설계정보는 무엇보다 대상선의 차후 설계에 대한 추진방향에 대한 예측과 기술적 한계를 설명한다는 점에서 의미가 있다.

선형과 추진기 대안 분석결과를 종합하여 다음 Table 1과 같이 3가지 변수의 개념 수준 설계가능영역(positive space) 조합을 도출하였다. 이후 도출된 결과를 토대로 "Narrower, Deeper" 개념에 따라 메타모델링과 설계영역탐색 그리고 최적화 설계를 수행하는 순서를 따른다.

Table 1. Exploration result of concept space

	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3
Profile			
Hull-form	Planing	Semi-planing	Semi-planing
Propulsor	Water-jet	Water-jet	FPP
Max. speed	40~55kts	30~45kts	
Length overall	26.1 ~ 44.3m		
Draft(T)	1.3 ~ 2.4m		
Displacement	78.8 ~ 236.3 ton		

3.3 메타모델링

통계분석 기법의 핵심 중 하나인 회귀분석(regression analysis) 모델링은 하나의 변수로부터 다른 변수의 값을 설명하거나 예측하는데 사용된다[4]. 공학 문제 대부분의 목적인 관련 변수 간의 상호 연관성을 밝히는 데 있어 유용하다. 변수 간의 관계를 설명하거나 예측하기 위해 자료를 적절한 함수식으로 모형화한다. 하나의 설명변수(독립)가 하나의 반응변수(종속)와 인과관계가 있는 경우를 단순회귀분석, 하나 이상과 인과관계가 있는 경우 다중회귀분석이라고 한다. 공학문제 대부분의 관심은 다중회귀분석(multiple regression analysis)에 해당한다.

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

여기서, R 은 관심 있는 반응변수(종속), x_i 는 독립(설명 또는 설계) 변수, b_i 은 회귀계수이다.

대부분의 합성설계 데이터베이스는 선종의 다양성이 제한되고 케이스의 수가 많지 않으며 (본 논문에서는 32척), 범주형 데이터와 연속형 데이터가 혼재하는 형태로 Eq. (2)와 같은 다항관계식 형태의 모형화가 사실상 어렵다[7]. 대신 대표적인 비선형 모델링 이론인 신경망(neural network) 모델을 이용하여 아래와 같이 모형화하였다.

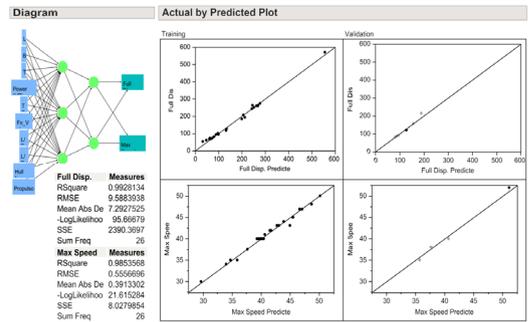


Fig. 8. Meta-modeling using neural network

위 그림은 전체 데이터셋을 연습(training)과 검증(validation)으로 알고리즘 내부적으로 임의 분류해 연습용 데이터로 모델링된 모형의 성능을 나머지 데이터로 검증한다는 의미다. 불완전하고 부정확한 모형화로 성급한 통계적 결론을 내리기 어려운 경우 신경망 모델에 의한 비선형 모델링이 주로 유용하게 사용되는 되는 점을 참고하였다[4,6,7].

반응변수는 고속정 설계에 있어 핵심 설계변수인 톤수와 최대속력으로 정의하였다. 모델링 결과 회귀분석 검증 척도인 결정계수(R²; RSquare)가 완벽을 의미하는 1에 가까운 0.99이므로 신뢰할만한 수준임을 알 수 있다. 다시 말해 모형이 실제 선박의 설계특성을 거의 완벽히 재현할 수 있다는 의미이다.

3.4 설계영역탐색 및 최적화

시각화 기능이 뛰어난 통계분석 패키지인 JMP는 실시간 설계영역탐색과 설계최적화를 지원하는 프로파일링

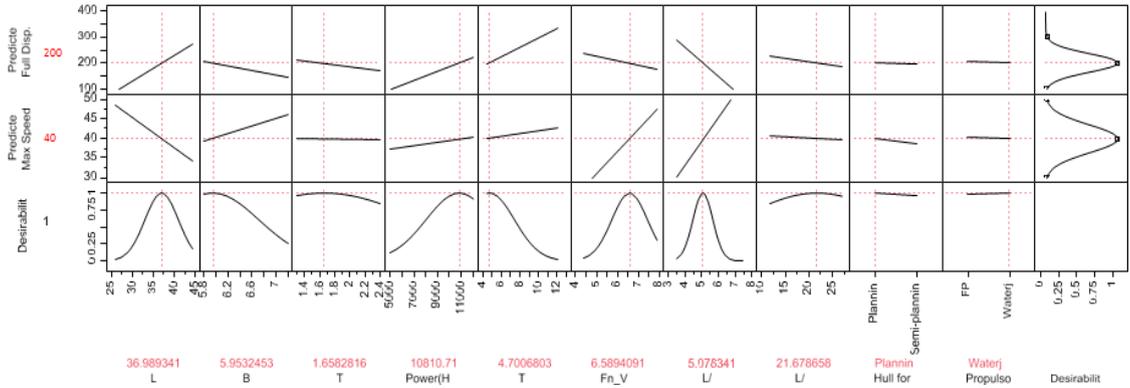


Fig. 9. Optimized result using desirability function

기능을 내장하고 있다[4]. 예측 프로파일러(prediction profiler)는 3.3절에서 모델링된 모형을 이용하여 독립변수(설명변수)의 미세한 변화에 따른 종속변수(반응변수; 최대속력, 만재톤수)의 변화를 실시간으로 확인할 수 있는 편리한 기능을 제공한다. 특히 프로파일러에 내장된 만족도함수(desirability function) D 를 이용하여 최적화(망목, 망대, 망소)를 시뮬레이션할 수 있다(Fig. 11).

$$D = (d_1 \times d_2 \times \dots \times d_n)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{i=1}^n d_i \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

여기서, d_i 는 i 번째 목적함수이며 n 은 고려하는 목적함수의 총 개수이다. Fig. 10에서 볼 수 있듯 n 은 2이며, d_i 는 최대속력과 만재톤수를 각각 말한다.

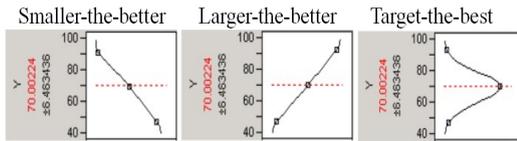


Fig. 10. Options of desirability optimization in JMP

최대속력 40노트, 만재배수량 200톤을 망목(target-the-best)으로 하는 최적화 시뮬레이션 결과 개략적인 길이, 폭, 깊이 및 설치마력 등을 얻을 수 있었다. Table 2에 따르면 망목으로 최적화 시 함 길이(L) 42.2m, 폭 (B) 6.7m, 흘수 (T) 3.9m 크기의 워터젯추진기 (Water-jet) 탑재, 활주선형(planing)을 적용하는 것이 목적함수를 만족하는 최적의 설계대안임을 의미한다. 프로파일러의 각 곡선의 양 또는 음의 기울기를 참고하

여 수평/수직바를 미세조정하거나 하단 설계변수값을 직접 수정 입력함으로써 쌍방향, 실시간 최적화 또한 가능하다. 다분야 협업설계에 유용한 도구이다.

Table 2. Optimized result using desirability function

Factor	Design	Response	
L (length)	36.99m	Max. speed	40kts
B (breadth)	5.95m	Displacement	200ton
T (draft)	1.66m		
Power	10,810HP		
Hull-form	Planing		
Propulsor	Water-jet		

또한, Fig. 11의 등고선도(contour profiler)를 이용해서 제한조건을 만족하는 설계가능영역과 불가능영역을 변수별로 실시간, 쌍방향으로 탐색할 수도 있다. 이 방법은 이해관계자가 다수 함께하는 교차기능팀(cross-functional team) 형태의 공동설계 시 서로 상충하는 설계변수의 관계에 대한 공통의 이해를 얻는데 유용하게 사용된다. 2차원 그래프에서 흰색 영역이 설계가능영역이며, 색상영역은 각각의 제한조건(40노트 이하, 200톤 이하) 또는 선호조건을 적용시 설계불가능영역, 즉 네거티브 공간에 해당한다.

지금까지 살펴본 설계영역탐색은 건조가능성검토와 같은 분석적(또는 확정적) 해를 얻는 것이 불필요하거나 불가능한 사업 초기 기획 설계시 현상(패턴)을 분석하고 결과를 통계적으로 예측하는 데 있어 유용한 방법이다. 이때는 충분한 기술적 정보도 부족하고, 고객의 정확한 의도를 파악하기도 힘들기 때문이다. 설사 있다 하더라도

오늘날 빠른 기술발전 속도나 고객의 변심에 따라 언제든 변경될 수 있는 불완전한 정보에 불과하다.

본 논문에서 제안한 새로운 건조가능성검토 방법론은 부분적으로 최적화된 하나 또는 많아야 2~3개 정도의 설계결과가 아니라 전체적으로 최적화된 사실상 무한개의 설계대안을 S/W적으로 생성할 수 있다는 점에서 기존의 방법과는 확연히 차이가 난다. Table 3에 기존 방법과 새로운 방법 간의 차이와 개선사항에 대해 요약하였다.

Table 3. Comparison of existing and new methodologies

	Existing	New
Core	Naval architecture	Systems engineering
Data	No database required	Database required
Time	2 weeks ~ 3 months	~ 1 week
Content	Text-intensive	Graph-intensive
Optimization	Locally optimized	Globally optimized
Tools	Few S/W introduced	Many S/W available

본 논문에서 제시하는 방법론은 이해관계자의 필요에 적합한 과하지도 부족하지도 않을 정도의 의사결정과 관련된 설계정보를 신속하게 제공하는 최적의 방법이다. 특히 기존에 짧게는 2주, 길게는 3개월이 필요했던 것을 최적화설계 검토까지 포함, 1주일 이내에 완수할 수도 있기 때문에 신속한 의사결정이 필요할 경우 그 효과를 크게 발휘할 수 있다. 더불어 오늘날 산업현장에서 늘어나고 있는 교차기능팀 또는 다분야 협업과 같은 동시공학 설계과정에서 유용한 그래픽 기반의 분석환경(visual

analytics)을 제공한다. 다양한 그래프와 도표가 스스로 말하고 있기 때문이다.

4. 결론

요구조건 조합을 목적으로 신속한 해를 얻어야 하는 건조가능성검토(또는 사업 타당성 검토)에 유용한 네거티브 설계개념과 통계분석을 이용한 설계영역탐색법을 제안하였다. 반응표면모델이나 신경망 모델을 이용한 함수식 개발로 반응변수(설계결과)를 설명하거나 예측함으로써 개략 설계영역탐색과 최적화를 쉽게 수행할 수 있음을 적용 예를 이용하여 확인하였다. 다양한 설계영역탐색 결과를 이용할 경우 다음 단계 설계의 기본적인 수행 방향과 패턴을 정립할 수 있을 것이다.

논문에서 살펴본 바와 같이 간단, 명료한 절차로 통계적으로 유의미한 결과를 제공하는 설계영역탐색 방법을 적용할 경우 외국과 같은 검증된 통합설계모델(ship synthesis model, 예) 미국 ASSET, 영국 Paramarine 등이 없는 우리의 현실적, 기술적 한계를 조금이나마 극복할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] Nobert Doerry, Philip Sims, "Concept Exploration Lessons Learned," *ASNE Day 2002 Proceedings*, American Society of Naval Engineers, D.C., USA, pp.1-18, Jan. 2002.
- [2] Nobert Doerry, Matt Garner, Adrian MacKenna, "Concept Exploration Methods for the Small Surface Combatant," *ASNE Day 2015 Proceedings*, American Society of Naval Engineers, RI, USA, pp.1-10, Nov. 2015.
- [3] Chris B. McKesson, "The Positive Value of Negative Design", Lecture note.
- [4] SAS, JMP Learning Library, Available From https://www.jmp.com/ko_kr/learning-library/using-jmp.html (assessed August 1, 2019)
- [5] Chris B. McKesson, "The Practical Design of Advanced Marine Vehicle," Technical report (N00014-09-1-0145), US Office of Naval Research, 2009.
- [6] Kwangki Lee, "Productivity improving using creative design of experiment methodology in research and development," Presentation, VP Korea, 2012.
- [7] Kwang Ki Lee, Yong Bum Lee and Seung Ho Han, "Robust Optimal Design of Disc Brake Based on

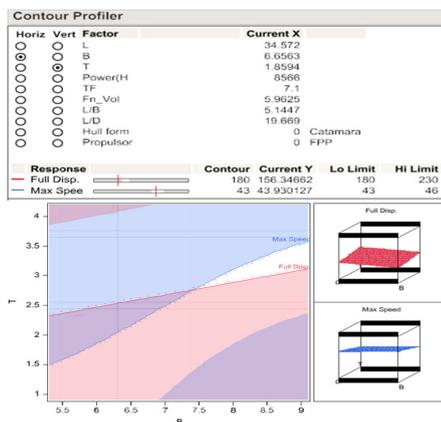


Fig. 11. Design space exploration using contour profiler: Breadth (B) versus Draft (T)

Response Surface Model Considering Standard Normal Distribution of Shape Tolerance," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, A, 34(9), 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2010.34.9.1305>

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 : 한얼솔루션 통합설계실 수석연구원

〈관심분야〉

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