



Received: 2021/08/06
Revised: 2021/09/09
Accepted: 2021/09/17
Published: 2021/09/30

***Corresponding Author:**

Mi-Ae Jeong
E-mail: jma0305jh@gmail.com

Abstract

북한의 SLBM 위협이 증가하고 있지만, 현재 대한민국 군이 보유하고 있는 수단만으로는 완전한 대응이 제한되는 실정이다. 원자력추진 잠수함은 북한의 SLBM에 대응하기 위한 효과적인 수단이 될 수 있다. 본 연구는 1, 2단계로 구분하여 1단계에서는 재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함의 효율성을 분석하고, 2단계에서는 원자력추진 잠수함 중 효율성이 높은 모델을 확인한다. 결과적으로 평가 대상으로 선정한 12개 클래스 중 로스엔젤레스급, 트라팔가급 등 5개 클래스가 100% 효율성을 달성한 것을 확인할 수 있다.

While North Korea's SLBM threat is increasing, it is difficult to make a complete response with the current means. Nuclear-powered submarines can be an effective means of responding to North Korea's SLBM. This study is divided into 1 and 2 phases, and in the 1st phase, the efficiency of conventional submarines and nuclear-powered submarines are compared, and in the 2nd phase, the efficient models of nuclear-powered submarines are analyzed. As a result, five classes, including Los Angeles-class and Trafalgar-class achieve 100% efficiency among the 12 classes selected as the evaluation group.

Keywords

한국형 원자력 추진 잠수함(Korean Nuclear-powered Submarine),
부정적 산출(Undesirable Output),
방향거리함수(Directional distance function model, DEA)

Acknowledgement

이 논문은 2020년도 한국해군과학기술학회 춘계학술대회 발표 논문을 보완 발전시켰음.

한국형 원자력추진 잠수함 도입 시 벤치마킹 모델 선정을 위한 효율성 분석: 방향거리함수 모형을 중심으로

Analysis of Efficiency for the Selection of Benchmarking Model to Prepare When a Korean Nuclear-powered Submarine Will be Acquired: Focusing on a Directional Distance Function Model

정미애^{1*}, 최영재², 이승진³, 이정환⁴

¹해군소령/해군 7기동전단 울곡이이함 전투정보관

²해군소령/해군본부 유도탄약과 대공유도무기담당

³해병소령/해병 2사단 포8대대 작전과장

⁴해군소령/해군 5성분전단 고준봉함 부장

Miae Jeong^{1*}, Youngjae Choi², Seungjin Lee³, Junghwan Lee⁴

¹LCDR/CICO, ROKS Yulgok Yi-I, 7th Task Flotilla, ROK Navy

²LCDR/Guided Missile & Ammunition Department, ROKN HQ, ROK Navy

³LCDR/Chief of Operation, 8th Battalion, Marine Corps 2nd Division, ROK Marine Corps

⁴LCDR/XO, ROKS GoJunBong, 5th Flotilla, ROK Navy

1. 서론

지난 2015년 5월 8일 북한의 SLBM(submarine launched ballistic missile) 수중사출시험이 최초 언론에 노출된 이래 신포급 잠수함은 2016년 4월 23일 SLBM 1발을 고도 30 km까지 발사하는데 성공하였고, 2016년 8월 24일에는 500 km까지 비행시키는 등 한반도와 동북아의 안보를 지속적으로 위협하고 있다. 그로 인해 '핵·대량살상무기 대응체계'만으로는 SLBM에 대해 효과적으로 대응하는 것이 어렵다고 평가되고 있다[1].

'핵·대량살상무기 대응체계'는 '전략표적 타격', '한국형미사일방어', '압도적 대응'으로 구성되며, 전략표적 타격'은 기존 한국형 3축체계의 킬 체인(kill chain)에 해당하는 개념이다[2]. 그러나 현재 군이 보유한 수단만으로는 SLBM을 탑재한 잠수함의 발사 징후를 포착 후 선제타격하는 개념의 '전략표적 타격' 임무를 수행하는 것이 제한적이며, '한국형미사일방어' 또한 사각지대에서 발사하는 SLBM에 대한 신속한 대응이 제한된다.

원자력추진 잠수함은 실질적으로 무한한 에너지를 바탕으로 한 지속가능성과 재래식 잠수함 이상의 기동성·은밀성을 지니므로, 북한의 SLBM 탑재 잠수함에 대한 ‘전략 표적 타격’ 임무를 수행하는 것이 가능한 전략무기로써 보유 필요성이 지속적으로 대두되고 있다. 이에 원자력추진 잠수함의 군사적 효용성과 국제법적 보유 가능 여부 등이 연구되었으며, 일부 연구에서는 한국형 원자력추진 잠수함을 해외로부터 구매하거나 혹은 국내 연구개발시 벤치마킹 가능한 모델을 선정하였다. 그러나, 선행된 연구에서는 벤치마킹 가능한 모델이 선정된 이유에 대한 정량적인 근거 없이 정성적인 이유만을 제시하고 있다.

따라서, 본 연구는 효율성 분석 방법론 중 하나인 방향거리함수 모형을 활용하되, 1·2단계로 구분하여 1단계에서는 재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함의 효율성을 비교하고, 2단계에서는 도입 검토가 필요한 원자력추진 잠수함에 대해 정량적으로 효율성을 분석하고자 한다. 효율성 분석에 많이 사용되는 DEA(data envelopment analysis)의 기본 모형은 긍정적인 투입, 산출요소만 고려하여 효율성을 분석하기 때문에, 원자력추진 잠수함을 도입함으로써 인해 예상되는 국제적 마찰이라는 부정적 산출을 반영하는 것이 제한된다. 따라서 본 연구에서는 부정적인 산출을 고려하여 효율성을 분석할 수 있는 방향거리함수 모형을 활용하여 국제적 마찰이라는 부정적 산출까지 반영해 효율성을 분석 후 이를 비교하였다. 2절에서는 원자력추진 잠수함 도입에 대한 쟁점사항을 검토하고 선행연구와 부정적 산출을 반영할 수 있는 방법, 방향거리함수 모형에 대해 이론적으로 소개하였다. 3장에서는 제안하는 모형의 1, 2단계별 DMU(decision making unit) 선정 결과, 투입·산출변수 선정 결과에 대해 설명하였다. 4절에서는 3절에서 제시한 모형으로 얻을 수 있는 단계별 효율성 분석 결과를 제시하였는데, 1단계에서는 방향거리함수 모형 및 DEA의 기본 모형인 CCR(Charnes, Cooper, Rhodes) 모형을 활용하여 재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함의 효율성을 비교하고 그 결과를 통계적으로 분석하였으며, 2단계에는 방향거리함수 모형을 활용하여 원자력추진 잠수함 간 효율성을 분석하였다. 5절에서는 연구결과와 제한사항을 제시하였다.

2. 문헌 연구

2.1 원자력추진 잠수함 도입에 관한 쟁점사항 검토

원자력추진 잠수함의 도입은 2004년에도 362사업이란

명칭으로 추진되었다가 언론에 조기 공개되면서 국내외의 압박으로 포기한 바가 있을 만큼 쟁점사항이 많은 문제이다[3]. 그러한 쟁점사항들을 바탕으로 현 시점에서 원자력추진 잠수함 도입이 가능한지 여부를 기술, 외교·정치, 경제 측면에서 간략히 살펴보자.

먼저, 기술적인 측면에서 우리나라는 UAE, 요르단 등에 원자로를 수출할 정도의 기술력을 보유한 세계 5위의 원자력 기술 강국이고, 3,000톤급 잠수함의 독자 설계도 경험한 바 있기 때문에 기술적인 문제는 쉽게 극복할 수 있다고 여겨진다[4]. 또한, 362사업 당시 한국원자력연구소 산하의 글로벌원자력전략연구소장 김시환 박사는 언론과의 인터뷰를 통해 원자력추진 잠수함용 원자로 기본 설계가 이미 2004년에 완료되었으며, 2년 안에 원자로를 제작해 잠수함에 장착할 수 있다고 주장하였는데, 이를 통해 우리나라의 잠수함용 원자로 기본 설계에 대한 지식이 상당수준으로 축적되어 있다고 판단할 수 있다[5].

외교·정치적인 측면에서 대한민국이 원자력추진 잠수함 도입 시 고려해야 할 핵 관련 국제조약으로는 핵무기확산금지조약(NPT), 국제원자력기구(IAEA) 안전조치, 한·미원자력협정 등이 있다. NPT(Nuclear Non-Proliferation Treat)는 핵 비확산, 원자력의 평화적 이용, 핵무기 경쟁 중지 등에 대한 조약으로서, 당사국의 평화적 활동이 핵무기 또는 핵폭발 장치의 제조에 전용되지 못하도록 하는 것이 주목표이다. 여기서 폭발목적 외 군사적 이용은 규제에서 제외되어 있으며, 해군 함정 추진용 원자로로는 핵무기나 핵폭발 장치와 무관하므로 원자력추진 잠수함 도입이 위 조약을 위반하지는 않는다고 말할 수 있다[6].

IAEA(International Atomic Energy Agency)는 원자력의 평화적 이용을 위한 연구와 국제적인 공동관리를 위하여 설립된 국제기구로서 우리나라는 핵물질 수·출입 시 IAEA의 승인을 받아야 하고, 핵물질을 군사적 목적으로 사용할 수 없다. 그러나 이러한 IAEA의 조약은 핵무기나 핵폭발 장치와 관련된 내용이며, 해군 함정 추진용 원자로가 이와 무관하므로 국제조약 위반은 아니라고 볼 수 있다[1].

마지막으로 고려해야 할 것은 한·미 원자력 협정이다. 한·미 원자력 협정은 한미 양국이 원자력 연료 이용에 관해 맺은 상호 협정으로, 제11조와 제13조를 주요하게 살펴볼 필요가 있다. 먼저 제11조는 농축, 재처리 및 그 밖의 형상 또는 내용 변경에 관한 조항으로서 1974년에 발효된 최초 협정에서는 대한민국의 핵연료 농축·재처리를 사실상 금지하였으나, 2015년 6월 개정된 조항에서는 우리나라 농축도가 20% 미만인 경우 양자 고위급 위원회의 서면 합의를

거쳐 농축 가능하게 되었다[7]. 이는 20% 미만의 저농축 우라늄을 이용한 원자력추진 잠수함 도입 시 정치·외교적인 제약이 완화된 것을 의미한다. 그러나 제13조는 폭발 또는 군사적 적용 금지에 관한 조항으로서 핵물질이 어떠한 군사적 목적을 위해서도 이용되지 아니한다고 명시하고 있어, 미축이 원자력추진 잠수함은 평화적 목적이 아니라고 주장할 가능성이 존재한다. 결론적으로 우리나라가 원자력추진 잠수함을 도입하기 위해서는 한·미원자력협정의 군사적 적용 금지에 대한 일부 개정이 필요하고 20% 이상의 농축을 위해서는 그에 대한 추가적인 개정이 필요하여, 2004년 원자력추진 잠수함 도입을 포기하였을 때보다는 다소 완화되었지만, 국제적 마찰 발생 가능성이 존재한다.

경제적인 측면에서 원자력추진 잠수함을 보유하기 위해서는 건조비용과 관련시설, 기술인원 확보 등에 많은 예산을 필요로 하는 것이 사실이다. 그러나 운용·유지 영역에서 살펴보면, 천연가스·석유가 4~7만톤 소모될 때 원자력에너지는 단 1톤만으로도 동일한 발전량을 생산할 수 있는 높은 경제성을 가지고 있다[8]. 뿐만 아니라 원자력추진 잠수함 1척으로 수 척의 재래식 잠수함이 실시하던 임무를 대체할 수 있다는 점을 감안하면, 그 전략적·작전적 효과는 금전적으로 환산할 수 있는 가치 이상의 것이라 생각된다.

2.2 부정적 산출이 있는 경우의 분석 방법론

효율성 분석을 위해 많이 사용되어온 방법론인 DEA는 주어진 투입요소에 대한 산출요소를 극대화하거나 반대로 고정된 산출요소에 대한 투입요소를 감소시켜 효율성을 증대시키는 문제이다. 그러나 조직이나 기업이 활동하면서 발생하는 산출요소가 항상 긍정적인 것은 아니다. 예를 들어, 발전소의 가동을 통해 전력이라는 산출물은 극대화시켜야 하는 긍정적 산출이지만, CO₂는 부정적 산출이다. 스포츠팀을 운영하면서 선수들의 역량은 긍정적 산출이지만 선수부상은 부정적 산출이다. 이와 마찬가지로 원자력추진 잠수함을 도입함으로써 인해 연계되는 해군 수중 전력의 기동성·생존성 향상은 긍정적 산출이지만, 예상되

는 국제적 마찰은 부정적 산출이므로 이를 고려하여 효율성을 분석하여야 한다.

부정적 산출을 고려한 효율성 분석을 위해 Seiford & Zhu는 부정적 산출이 증가하면 효율성이 낮아질 수 있도록 부정적 산출에 음수를 곱하고, 선형계획법의 비음조건을 만족하도록 다시 상수를 더하는 방법을 제안하였다[10]. 하지만 DEA의 기본적인 모형 중 규모가 변하여도 효율이 변하지 않는 CCR(Charnes, Cooper, Rhodes) 모형 등 변환불변성을 가정하고 있는 DEA 모형에는 이를 적용할 수 없다는 단점이 있다[11].

부정적 산출을 고려할 수 있는 다른 방법으로는 여유분을 고려한 모형인 SBM(slack-based measure)을 일부 변형하여 활용하는 방법이 있다. SBM은 강효율점과 여유분을 가지는 약효율점을 구별하지 않는 DEA 모형의 변별력 문제를 해결하고 투입·산출의 변화를 동시에 고려하기 위해 고안된 방법이다. 여유분을 투입여유분과 산출여유분으로 나누어 투입값에서 투입여유분을 뺀 값이 기존 투입값에 비해 얼마나 줄었는지를 M 개의 투입요소에 대해 평균하고, 산출값에서 산출여유분을 더한 값이 기존 산출값에 비해 얼마나 늘었는지를 N 개의 산출요소에 대해 평균한 값을 구해, 평균 투입은 최대한 줄이고 평균 산출은 최대한 늘이도록 목적함수를 설정한다[12]. Tone은 SBM 모형 중 산출을 긍정적 산출과 부정적 산출로 구분하여 효율성을 분석한 모형을 제안하였다[13]. 그러나 SBM 모형은 효율성 값이 현실적으로 의미하는 바가 모호하다는 단점이 있어, 이를 활용해 부정적 산출까지 고려한 효율성 값을 구하더라도 해석하기가 어렵다는 문제가 있다[14].

부정적 산출을 고려한 또 다른 방법론은 방향거리함수 모형을 활용하는 것이다. 방향거리함수 모형은 SBM과 같이 투입과 산출을 동시에 변화시킬 수 있는 모형인데, 비효율성을 제거해야 하는 방향을 의미하는 방향벡터를 정의하고, 그 경로를 따라 투입을 줄이면서 동시에 산출을 늘려가도록 관측점을 효율적인 상태에 있는 생산변경(production frontier)으로 이동시킬 수 있고, 많은 연구자들로부터 부정적 산출을 고려할 수 있는 가장 효과적인 방법론으로 여겨져 왔다[15].

따라서 본 연구에서는 방향거리함수 모형을 활용하여 원자력추진 잠수함 도입시 예상되는 부정적 산출까지 고려함으로써 재래식 잠수함과 비교하고, 원자력추진 잠수함 간 효율성을 분석해 벤치마킹 모델 선정을 위한 정책적인 판단시 정량적인 데이터를 제공함으로써 정책결정을 지원하고자 한다.

1) 한국형 원자력추진 잠수함 도입의 필요성과 확보방안에 대해 연구영역을 진행했던 신인균은 북한의 SLBM 탑재 잠수함 감시를 위해서는 AIP를 탑재한 재래식 잠수함 기준으로 이동속력 및 재보급 주기 고려할 때 27척이 필요하며, 원자력추진 잠수함은 무한한 동력원을 지니기 때문에 이를 대체할 수 있다고 언급하였다. 또한, 전 한국방위산업진흥회 전무이사 임한규는 원자력추진 잠수함의 필요성을 언급하면서, 원자력추진 잠수함의 건조비용은 재래식 잠수함의 약 2배이나, 전략적 가치는 10배가 넘는다고 언급하였다[9].

2.3 방향거리함수 모형

방향거리함수 모형은 효율성 개선의 방향을 나타내는 방향벡터를 $(g_m^x, g_n^y) = (g_1^x, g_2^x, \dots, g_M^x, g_1^y, g_2^y, \dots, g_N^y)$ 으로 정의하고, 이 경로를 따라 방향벡터의 일정한 비율로 관측치의 투입은 줄이되, 산출을 늘여 생산변경으로 이동시키면서 효율성을 개선한다. 방향벡터로 인해 개선된 투입·산출은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} x_m^* \\ y_n^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_m - \theta g_m^x \\ y_n + \theta g_n^y \end{pmatrix} \tag{1}$$

개선된 투입·산출을 생산가능집합(production possibility set) 내에 있게 하는 제약조건 하에서 방향벡터의 경로를 따라 투입·산출을 개선할 때 최대 변화 거리를 구하는 것이 방향거리함수 모형의 목적함수이다. 불변규모수익인 CRS(constant returns to scale) 조건 하에서 이를 식으로 나타내면 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_{DIR}^{k*} &= \max \theta \\ \text{subject to} \\ x_m^k - \theta g_m^x &\geq \sum_{j=1}^J x_m^j \lambda^j \quad (m = 1, 2, \dots, M); \\ y_n^k + \theta g_n^y &\leq \sum_{j=1}^J y_n^j \lambda^j \quad (n = 1, 2, \dots, N); \\ \lambda^j &\geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, J) \end{aligned} \tag{2}$$

그런데 산출요소 중 부정적 산출이 있는 경우는 생산가능집합을 정의함에 있어 새로운 공리가 필요하다. 부정적 산출이 있는 경우의 방향거리함수 모형을 설명하기 위해 투입을 x , 긍정적 산출을 y^g , 부정적 산출을 y^b 라고 하면, 투입요소 x 로 생산가능한 긍정적 산출과 부정적 산출의 양을 나타내는 생산가능집합은 식(3)과 같다.

$$\psi = \{(x, y^g, y^b) : x \text{ can produce } (y^g, y^b)\} \tag{3}$$

생산가능집합을 구성하기 위해 긍정적 산출과 부정적 산출이 함께 생산될 경우의 특징을 살펴보면 다음과 같다. 첫째, 부정적 산출이 생산되면, 긍정적 산출도 생산된다. 이는 식(4)와 같이 수식화할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{If } (x, y^g, y^b) \in \psi \text{ and } y^b = 0, \\ \text{then } y^g = 0 \end{aligned} \tag{4}$$

둘째, 현재 생산 가능한 긍정적 산출과 부정적 산출의 생산 수준을 일정 비율로 줄여도 생산이 가능하다. 이 성질을 약가처분성(weak disposability)라 하며 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{If } (x, y^g, y^b) \in \psi \text{ and } 0 \leq \theta \leq 1, \\ \text{then } (x, \theta y^g, \theta y^b) \in \psi \end{aligned} \tag{5}$$

셋째, 긍정적 산출은 자유가처분성(free disposability)을 가지나, 부정적 산출은 자유가처분성을 갖지 않는다. 자유가처분성은 어떤 투입과 산출이 생산 가능한 조합일 때, 투입을 더 많이 하거나 산출을 더 적게 얻는 조합 또한 생산 가능하다는 것인데, 부정적 산출을 갖는 경우에는 동일한 조건에서 부정적 산출을 줄이는 것이 생산 가능하지 않다는 것을 의미한다.

따라서 위 가정들을 종합하여 가상의 관측치 A, B, C, D, K 로 생산가능집합을 도식화해보면 Fig. 1과 같고, 생산가능집합은 $OABCD$ 이다. 생산가능집합 내부에 있는 K 점은 생산변경 선상에 있는 다른 점들에 비해 비효율적이며, 방향거리함수를 활용하여 얼마나 비효율적인지를 측정할 수 있다. 비효율성의 크기는 방향벡터 (d^g, d^b) 에 따라 달라질 수 있는데, 방향벡터를 정해주는 고정된 규칙은 없지만 일반적으로 (y^g, y^b) 가 많이 사용된다[14]. 이는 분석대상인 관측치가 현재 생산하는 만큼의 긍정적 산출과 부정적 산출의 비율의 방향으로 긍정적 산출은 증가시키고, 부정적 산출은 감소시키는 것을 의미한다.

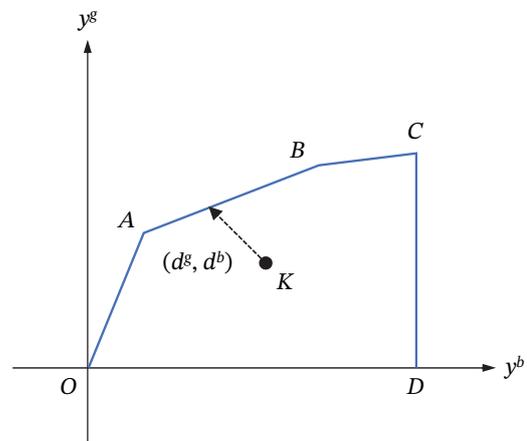


Fig. 1. 부정적산출과 긍정적산출이 모두 존재하는 경우의 생산가능집합

방향벡터를 (y^g, y^b) 로 두었을 때 k 번째 관측치의 비효율성을 계산하는 선형계획법은 식 (6)과 같다. 얻어지는 β 가 0이면 효율적인 생산점, $\beta > 0$ 이면 비효율적인 생산점이며, β 값을 통해 현재 생산하고 있는 긍정적 산출을 $\beta \times 100\%$ 증가 및 부정적 산출을 $\beta \times 100\%$ 감소시켜 효율적인 생산점에 도달할 수 있음을 알 수 있다.

$$\vec{D} = (x, y^g, y^b : y^g, y^b) = \max \beta$$

subject to

$$x_m^k \geq \sum_{j=1}^J x_m^j \lambda^j \quad (m = 1, 2, \dots, M);$$

$$y_p^g + \beta y_p^g \leq \sum_{j=1}^J y_p^{g,j} \lambda^j \quad (p = 1, 2, \dots, P);$$

$$y_q^b - \beta y_q^b \leq \sum_{j=1}^J y_q^{b,j} \lambda^j \quad (q = 1, 2, \dots, Q);$$

$$\lambda^j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, J)$$

2.4 선행연구

한국형 원자력추진 잠수함 도입의 필요성과 확보방안에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 이 중 원자력추진 잠수함 도입 시 벤치마킹할 수 있는 모델을 제시한 연구로 신인균은 언론에 공개된 바에 따르면 해군에서 발주한 연구용역 과제에 입찰해 2017년 10월부터 2018년 5월까지 한반도에서 원자력추진 잠수함의 유용성과 건조 가능성 연구를 진행하였으며, 이 보고서는 2022년까지 미공개중이나 프랑스의 바라쿠다급을 벤치마킹 모델로 선정한 것으로 알려졌다[16]. 이 연구의 활용결과 보고서에 따르면, 원자력추진 잠수함의 국내개발 관련 기술적 가용성, 예상되는 총사업비, 군사적 효용성, 국제법적 가능 여부를 중점적으로 연구하였음을 알 수 있다.

최종수는 원자력추진 잠수함의 필요성과 전략적 가치를 분석하고, 한국형 원자력추진 잠수함 확보방안을 중점적으로 연구하였으며, 미국·영국·프랑스의 원자력추진 잠수함 4척을 검토해 최종적으로 미국의 버지니아급이 가장 유리할 것으로 판단하였다[17]. 그러나 이러한 원자력추진 잠수함 도입과 관련된 선행된 연구들은 벤치마킹 모델이 선정된 이유에 대한 정량적인 근거는 제시하지 않고 있다.

효율성 분석 모형 중 부정적 산출을 포함한 방향거리함수 모형에 관한 연구는 다양한 분야에서 진행되어 왔다. 오

미영·김성수는 서울 시내버스업체의 효율성을 분석하기 위해 사고 및 대기오염 비용을 부정적인 산출로 포함한 방향거리함수 모형을 연구하였다[18]. 김재현은 장기손해보험에서 발생하는 효력상실·해약환급금 등을 부정적 산출로 포함하여 손해보험사의 효율성을 분석하였다[19]. 신정훈·황승준은 자동차 부품기업에 대한 재무효율성을 분석하면서 차입금과 같은 기업의 경영성과에 부정적인 영향을 미치는 요소를 부정적 산출로 포함하였다[20].

국방분야에서는 효율성 분석을 위해 DEA의 전통적인 방법론인 CCR, BCC(Banker, Charnes, Cooper) 모형부터 전통적인 모형의 변별력을 높이기 위해 가중치 제약을 주는 DEA-AR(assurance range) 모형, 범주형 자료나 서수형 자료를 반영하기 위한 IDEA(imprecise DEA) 모형 등이 다양하게 연구되었지만 부정적 산출을 포함한 방향거리함수 모형을 활용한 연구는 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 원자력추진 잠수함 도입 시 벤치마킹할 수 있는 모델을 정량적인 근거에 의거하여 분석하되, 방향거리함수 모형을 활용하여 부정적 산출까지 고려하고자 한다.

3. 모형 설계 제안

본 연구는 Fig. 2와 같이 크게 2단계로 진행된다. 1단계는 재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함의 효율성을 비교하는 단계로, 윌콕슨-만-위트니 검정법(Wilcoxon-Mann-Whitney test)을 이용하여 두 잠수함 집단 간 효율성 차이가 통계적으로 유의미한지 확인하였다. 2단계는 원자력추진 잠수함 간 효율성 비교를 통해 벤치마킹 모델로 선정 가능한 클래스를 확인하는 단계이다.

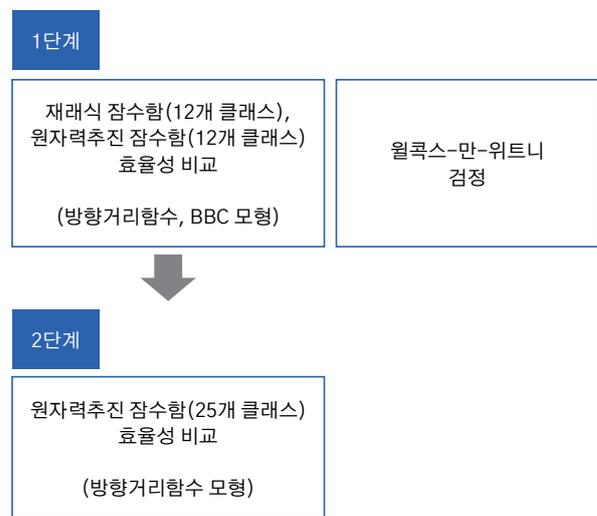


Fig. 2. 제안하는 모형 연구 단계

3.1 DMU 선정

각 단계에서 효율성을 분석하는 대상은 다르게 선정되어야 한다. 1단계는 재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함의 효율성을 비교하는 단계이므로 재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함 중 일부를 DMU로 선정하였다. 재래식 잠수함은 전 세계에서 운용되고 있는 클래스가 매우 다양하기 때문에, 우리나라에서 운용하고 있는 장보고, 손원일급을 포함한 러시아·중국·일본의 재래식 잠수함 12개 클래스를 DMU로 선정하였다. 원자력추진 잠수함은 미국 4개 클래스, 러시아 10개 클래스, 중국 3개 클래스, 영국 3개 클레

스, 프랑스 3개 클래스, 인도 2개 클래스가 운용되고 있어 2019년 진수하여 전력화 중인 프랑스의 바라쿠다급까지 포함하여 6개국 25개 클래스가 운용되고 있다[21].

1단계에서는 이 중 도입 현실성이 떨어지는 러시아와 중국의 원자력추진 잠수함을 제외한 4개국 12개 클래스를 DMU로 선정하였다. 1단계의 DMU 선정결과는 Table 1과 같다.

2단계는 원자력추진 잠수함 간 효율성을 비교하는 단계이다. 2단계에서는 다양한 데이터들을 통해 가장 효율적인 생산변경을 찾기 위해 Table 2와 같이 러시아와 중국의 원자력추진 잠수함까지 DMU에 포함시켰다.

Table 1. 1단계 DMU 선정 결과

잠수함	DMU		배수량 (수중, ton)	전장×전폭 (m)	수중 순항속력 (kts)	추진방식	무장
	국가	클래스					
재래식 잠수함 (12개 클래스)	대한민국	장보고급	1,350	56.5×6.2	5	AIP 미탑재	16발(대함·대지·어뢰)
		손원일급	1,860	65×6.3	5	AIP	14발(대함·대지·어뢰)
		위스키급	1350	76×6.5	5	AIP 미탑재	12발(어뢰)
	러시아	로미오급	1,830	76.6×6.7	5	AIP 미탑재	14발(어뢰)
		상어급	370	35.5×3.8	4	AIP 미탑재	4발(어뢰)
	중국	송급	2,250	74.9×8.4	5	AIP	18발(대함·대지·어뢰)
		킬로급	3,076	73.8×9.9	5	AIP 미탑재	18발(어뢰)
		밍급	2,113	76×7.6	5	AIP 미탑재	16발(어뢰)
		위안급	2,600	72×8.4	5	AIP	18발(대함·대지·어뢰)
		하루시오급	2,750	76×9.9	5	AIP 미탑재	20발(대함·대지·어뢰)
	일본	유우시오급	2,900	78×10	5	AIP 미탑재	20발(대함·대지·어뢰)
		오야시오급	4,000	81.7×8.9	5	AIP 미탑재	20발(대함·대지·어뢰)
로스엔젤레스급		7,124	109.7×10.1	33	원자력(97.3 % 우라늄)	26발(대함·대지·어뢰)	
미국	오하이오급	19,000	170.7×12.8	25	원자력(93.0 % 우라늄)	52발(대함·대지·어뢰)	
	시울프급	12,353	131.8×12.2	39	원자력(93.0 % 우라늄)	50발(대함·대지·어뢰)	
	버지니아급	7,925	114.8×10.36	34	원자력(93.5 % 우라늄)	36발(대함·대지·어뢰)	
	뱅크스급	16,236	170.7×12.8	25	원자력(93.0 % 우라늄)	36발(대지·어뢰)	
원자력추진 잠수함 (12개 클래스)	영국	트라팔가급	5,292	138.1×12.2	32	원자력(93.0 % 우라늄)	28발(대함·대지·어뢰)
		아스튜트급	7,519	114.8×10.36	29	원자력(93.0 % 우라늄)	40발(대함·대지·어뢰)
	루비스급	2,713	73.6×7.6	25	원자력(7.5 % 우라늄)	24발(대함·어뢰)	
프랑스	트리옹팡급	14,565	138×17	25	원자력(7.5 % 우라늄)	18발(대지·어뢰)	
	바라쿠다급	5,300	99.5×8.8	25	원자력(5.0 % 우라늄)	20발(대함·대지·어뢰)	
인도	차크라급	9,246	110×14	28	원자력(40.0 % 우라늄)	8발(대함·어뢰)	
	아리한트급	6,600	111.6×11	24	원자력(40.0 % 우라늄)	10발(대지·어뢰)	

Table 2. 2단계 DMU 선정 결과

잠수함	DMU		배수량 (수중, ton)	전장×전폭 (m)	수중 순항속력 (kts)	추진방식	무장	
	국가	클래스						
원자력추진 잠수함 (25개 클래스)	미국	로스엔젤레스급	6,927	109.7×10.1	33	원자력(97.3% 우라늄)	26발(대함·대지·어뢰)	
		오하이오급	18,750	170.7×12.8	25	원자력(93.0% 우라늄)	52발(대함·대지·어뢰)	
		시울프급	12,158	131.8×12.2	39	원자력(93.0% 우라늄)	50발(대함·대지·어뢰)	
		버지니아급	7,800	114.8×10.36	34	원자력(93.5% 우라늄)	36발(대함·대지·어뢰)	
		뱅크스급	16,236	170.7×12.8	25	원자력(93.0% 우라늄)	36발(대지·어뢰)	
	영국	트라팔가급	5,292	138.1×12.2	32	원자력(93.0% 우라늄)	28발(대함·대지·어뢰)	
		아스투트급	7,519	114.8×10.36	29	원자력(93.0% 우라늄)	40발(대함·대지·어뢰)	
		루비스급	2,713	73.6×7.6	25	원자력(7.5% 우라늄)	24발(대함·어뢰)	
	프랑스	트리옹팡급	14,565	138×17	25	원자력(7.5% 우라늄)	18발(대지·어뢰)	
		바라쿠다급	5,300	99.5×8.8	25	원자력(5.0% 우라늄)	20발(대함·대지·어뢰)	
	인도	차크라급	9,246	110×14	28	원자력(40.0% 우라늄)	8발(대함·어뢰)	
		아리한트급	6,600	111.6×11	24	원자력(40.0% 우라늄)	10발(대지·어뢰)	
	비평가 대상군	러시아	타이푼급	26,925	171.5×24.6	25	원자력(40.0% 우라늄)	22발(대지·어뢰)
			칼마급	13,463	160×12	24	원자력(40.0% 우라늄)	24발(대지·어뢰)
			델핀급	19,711	166×12	24	원자력(40.0% 우라늄)	18발(대지·어뢰)
			시에라급	9,246	111×14.2	32	원자력(40.0% 우라늄)	40발(대함·대지·어뢰)
			슈카급	9,652	110×13.6	28	원자력(40.0% 우라늄)	40발(대함·대지·어뢰)
		중국	아쿨라급	9,246	110×14	28	원자력(40.0% 우라늄)	22발(대함·어뢰)
			안테이급	18,594	154×18.2	28	원자력(40.0% 우라늄)	56발(대함·대지·어뢰)
			콘도르급	9,246	111×14.2	32	원자력(40.0% 우라늄)	40발(대함·대지·어뢰)
			브레이급	19,711	111×14.2	25	원자력(40.0% 우라늄)	24발(대지·어뢰)
			야센급	11,800	133×10.6	28	원자력(40.0% 우라늄)	62발(대함·대지·어뢰)
	중국	한급	5,550	106×10	25	원자력(4.0% 우라늄)	36발(대함·어뢰)	
		상급	6,000	107×11	30	원자력(4.0% 우라늄)	22발(대함·어뢰)	
		진급	11,000	137×12.5	25	원자력(4.0% 우라늄)	28발(대지·어뢰)	

3.2 투입, 산출변수 선정

투입, 산출변수를 적절하게 선정하는 것은 본 연구의 타당성에 결정적인 영향을 미친다. 국내외 효율성 분석에서 사용된 투입과 산출 요소 자료에 따르면, 무기체계 효율성 분석에서 투입변수로 톤 수, 전장, 승조원 수가 주로 사용되었고, 산출변수로 항해능력, 대함/대공/대잠/대지무기 체계가 사용되었다[11]. 차기 구축함의 효율성 분석을 위한 AHP/DEA-AR 모형을 설계한 선행연구에서는 투입변수로 톤 수, 승조원 수를 사용하였고, 산출변수로는 함정 설계

및 건조를 위한 기본지침을 제공하는 문서인 함정건조기 본지침서 상 주요 요구성능의 범주인 화력지수, 기동성지수, 생존성지수로 선정하고 전투함 전력지수 분석모형을 통해 이 수치를 정량적으로 확인하였다[22].

본 연구에서는 국내외 효율성 분석에서 사용되었던 산출변수인 대함/대공/대잠/대지무기체계가 전투함 전력지수 분석모형을 활용한 화력지수, 기동성지수, 생존성지수에 포함되며, 후자가 더 폭넓은 전투함의 성능을 나타낼 수 있음을 고려하여 화력지수, 기동성지수, 생존성지수를 산출변수로 선정하였으며, 다음의 잠수함 전력지수 분석

모형을 활용하여 정량적 수치로 변환하였다.

(1) 화력지수(F) = 대함·대잠 공격능력 + 대지공격능력

$$= \sum_{i=1}^n f_i k_i c$$

$$*f_i = i \text{ 유형 대함·대잠·대지공격무기의 화력}$$

$$= \sqrt{\text{탄두중량} \times \text{사거리}}$$

$$*k_i = i \text{ 유형 무기의 수량}$$

(2) 기동성지수(M) = (수중순항속도 × 마력 대 중량비 × 전폭 대비 전장비)^{1/3}

(3) 생존성지수(S) = $\sqrt{\text{잠항심도} \times \text{잠항지속능력} \times \text{음향흡수타일 가중상수}}$

*잠항심도: 100 m를 기준으로 지수화
(잠항심도 300 m의 잠수함은 3의 값을 부여)

*잠항지속능력: 원자력잠수함 30, AIP 탑재 잠수함 4.7, 디젤잠수함 1의 값을 부여

*음향흡수타일 가중상수: 음향흡수타일 부착시 2, 미보유시 1

화력지수는 유형별 무장의 탄두중량과 사거리, 수량을 고려하여 산출하였고, 기동성지수는 수중순항속도, 마력 대 중량비, 전폭 대비 전장비로 산출하였다. 생존성지수는 잠항심도와 잠항지속능력, 음향흡수타일을 고려하였는데, 잠항지속능력은 원자력잠수함에 30, 재래식 잠수함 중에서도 AIP(air independent propulsion)를 탑재한 잠수함에 4.7, 일반 재래식 잠수함에 1을 부여하였다. 일반 재래식 잠수함은 수중에서 항해시 축전지에 저장된 전력으로 추진 전동기를 구동하고, 이 전동기에 연결된 프로펠러를 회전시킴으로써 추진력을 얻게 되는데, 축전지는 저속으로 기동하더라도 약 3일이 경과하면 모두 방전되며, 이를 충전하기 위해서는 공기를 흡입하여 디젤엔진을 구동시켜야 하므로 최대 잠항기간이 약 3일로 여겨진다. AIP를 탑재한 잠수함은 흡입한 공기로 연소반응을 일으켜 디젤엔진을 구동시키는 기존 재래식 잠수함과 달리 연료전지에서 발생하는 수소와 산소 간의 전기화학 반응에 의해 전기를 발생시킴으로써 부상 없이 상당 기간 동안 수중 항해가 가능하다. 하지만 이같은 AIP 탑재 잠수함이라 하더라도 14일 정도까지만 잠항이 가능하다. 원자력추진 잠수함은 원칙적으로는 영구적인 잠항지속능력을 가지지만, 군수적재나 승무원의 피로도 등을 고려하여 통상 90일을 잠

항지속기간으로 여긴다.

전력지수 분석모형에서 사용한 잠항지속능력 1, 4.7, 30이라는 수치는 유형별 잠수함의 잠항지속기간 3일, 14일, 90일을 AIP 미탑재 재래식 잠수함의 3일을 기준으로 상대적으로 변환한 수치이다. 음향흡수타일은 적 전투함이나 잠수함, 어뢰의 소나에서 방사하는 음파를 흡수하여 적의 탐지능력을 떨어뜨리는데, 음향흡수타일을 부착하지 않은 잠수함의 피탐 확률이 음향흡수타일을 부착한 잠수함의 피탐 확률보다 2배 정도 높기 때문에 부착 여부에 따라 1, 2의 수치를 부여하였다[24].

추가적으로 고려되어야 하는 필수적인 산출변수로 원자력추진 잠수함 도입의 주요 쟁점사항인 국제적 마찰이 있다. 이는 원자력추진 잠수함을 도입함으로써 발생하는 국제적 마찰의 정도가 우리나라 농축도에 비례할 것이라는 가정 하에 우리나라 농축도를 산출변수로 포함시켜 정량적인 수치로 반영하였다. 이 변수는 수치가 높아질수록 효율성이 떨어지는 부정적 산출물에 속한다. 다만, 국제적 마찰은 재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함의 효율성을 비교하는 1단계에서는 동일한 기준으로 적용하는 것이 모호하여 배제하였다.

투입변수로는 선행연구를 참고하여 톤 수와 전장을 선정하였다. 톤 수와 전장은 서로 상관관계가 높긴 하지만 DEA 자체가 비모수적인 방법이기 때문에 변수 간의 상관관계가 통계적 영향을 미친다고 보기는 어려우므로[11], 톤 수와 전장을 모두 투입변수로 포함시켰다. 승조원 수는 도입하는 플랫폼 외에도 내부 전투체계나 무장의 자동화 정도에 따라 크게 변화할 수 있는 부분으로, 벤치마킹 모델이 선정된다 하더라도 기존 모델의 승조원 수를 그대로 준용하지 않을 가능성이 높다고 판단하여 투입변수로 선정하지 않았다. 따라서 위 사항들을 종합한 투입·산출변수는 Table 3와 같으며, 단계별 DMU의 투입·산출변수를 정량적으로 변환한 값은 Tables 4-5와 같다.

Table 3. 투입·산출변수 선정 결과

변수 종류		변수명
투입변수		톤수
		전장
산출변수	긍정적 산출	화력
		기동성
	부정적 산출	생존성
		국제적 마찰

Table 4. DMU별 투입·산출변수의 정량적 수치 (1단계)

DMU		투입변수			산출변수		
잠수함	국가	클래스	톤 수	전장	화력*	기동성	생존성
재래식 잠수함 (12개 클래스)	대한민국	장보고급	1,350	56.5	3,070.85	5.35	1.58
		손원일급	1,860	65	2,360.64	6.10	4.34
	러시아	위스키급	1,350	76	929.52	4.89	1.73
		로미오급	1,830	76.6	1,084.44	4.41	1.73
	중국	상어급	370	35.5	226.27	3.10	1.34
		송급	2,250	74.9	1,428.30	4.23	3.75
		킬로급	3,076	73.8	1,178.56	4.15	1.73
		밍급	2,113	76	1,104.98	5.00	1.73
		위안급	2,600	72	1,228.64	4.18	7.50
	일본	하루시오급	2,750	76	2,873.27	4.64	3.74
		유우시오급	2,900	78	2,873.27	4.60	1.66
		오야시오급	4,000	81.7	2,873.27	4.44	3.74
원자력추진 잠수함 (12개 클래스)	미국	로스앤젤레스급	6,927	109.7	10,206.71	12.24	23.24
		오하이오급	18,750	170.7	49,462.47	10.21	8.56
		시울프급	12,158	131.8	20,168.47	11.77	13.34
		버지니아급	7,800	114.8	11,431.45	12.44	12.10
	영국	뱅크급	16,236	170.7	18,318.96	8.27	8.66
		트라팔가급	5,292	138.1	3,018.96	10.04	9.49
		아스투트급	7,519	114.8	13,410.92	10.50	9.49
	프랑스	루비스급	2,713	73.6	5,351.02	9.47	11.62
		트리옹팡급	14,565	138	13,410.92	8.28	12.25
	인도	바라쿠다급	5,300	99.5	5,351.02	7.98	10.95
		차크라급	9,246	110	3,174.84	10.41	26.83
		아리한트급	6,600	111.6	5,811.12	8.99	11.62

*화력지수는 해당 함정에 탑재되는 무장의 탄두 중량과 사거리를 확인하여 산출하였다. 하지만 일부 클래스(러시아, 중국) 함정은 탑재된 무장의 제원 확인이 제한되어, 함정에 설치된 발사관의 직경, 무장탑재 가능 수량, 해당 국가에서 보유하고 있는 무장을 고려하여 탑재무장을 추정 후 화력지수를 산출하였다.

Table 5. DMU별 투입·산출변수의 정량적 수치 (2단계)

DMU		투입변수			산출변수			국제적 마찰*
잠수함	국가	클래스	톤 수	전장	화력	기동성	생존성	국제적 마찰*
원자력추진 잠수함	미국	로스앤젤레스급	6,927	109.7	10,206.71	12.24	23.24	97.3
		오하이오급	18,750	170.7	49,462.47	10.21	8.56	93.0
		시울프급	12,158	131.8	20,168.47	11.77	13.34	93.0
		버지니아급	7,800	114.8	11,431.45	12.44	12.10	93.5
	영국	뱅크급	16,236	170.7	18,318.96	8.27	8.66	93.0
		트라팔가급	5,292	138.1	3,018.96	10.04	9.49	93.0
		아스투트급	7,519	114.8	13,410.92	10.50	9.49	93.0

(다음 페이지에 계속)

Table 5. (이전 페이지에서 계속)

DMU		투입변수			산출변수			
잠수함	국가	클래스	톤 수	전장	화력	기동성	생존성	국제적 마찰*
원자력추진 잠수함	프랑스	루비스급	2,713	73.6	5,351.02	9.47	11.62	7.5
		트리옹팡급	14,565	138	13,410.92	8.28	12.25	7.5
		바라쿠다급	5,300	99.5	5,351.02	7.98	10.95	5.0
	인도	차크라급	9,246	110	3,174.84	10.41	26.83	40.0
		아리한트급	6,600	111.6	5,811.12	8.99	11.62	40.0
	러시아	타이푼급	26,925	171.5	18,175.54	8.07	9.49	40.0
		칼마급	13,463	160	18,146.63	9.63	9.8	40.0
		델핀급	19,711	166	25,568.21	8.57	21.9	40.0
		시에라급	9,246	111	38,146.63	10.84	15	40.0
		슈카급	9,652	110	30,219.94	10.36	11.62	40.0
		아쿨라급	9,246	110	37,928.73	10.41	24	40.0
		안테이급	18,594	154	40,131.68	10.8	11.22	40.0
		콘도르급	9,246	111	31,540.5	10.84	12.49	40.0
		브레이급	19,711	170	33,667.79	9.36	11.62	40.0
		아센급	11,800	133	26,652.34	10.8	13.96	40.0
	중국	한급	5,550	106	3,571.79	18.03	9.49	4.0
		상급	6,000	107	3,571.79	21.47	18.97	4.0
		진급	11,000	137	14,349.16	9.48	18.97	4.0

*러시아의 일부 원자력추진 잠수함(칼마급, 델핀급, 슈카급, 안테이급, 콘도르급)의 우리나라 농축도 자료 확보는 제한되었지만, 1981년 이후 건조된 러시아 원자력추진 잠수함의 우리나라 농축도는 21% - 45%라는 자료와 다른 러시아 원자력추진 잠수함의 우리나라 농축도 자료에 근거하여 40%로 적용하였다. 중국의 원자력추진 잠수함의 우리나라 농축도는 3% - 5%라는 자료를 바탕으로 4%로 적용하였다.

4. 잠수함 효율성 비교 결과

4.1 재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함의 효율성 비교

재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함 간의 효율성 비교는 우리나라와 주변국 재래식 잠수함 12개 중 평가대상군으로 선정된 12개 클래스에 대해 실시하였다. 이 때 산출변수 중 국제적 마찰은 재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함을 동일한 기준에 의거하여 평가하는 것이 제한되어 배제하였다. 또한 효율성 값은 방향거리함수 모형과 더불어 DEA의 전통적인 모형 중 투입기준 CCR 모형을 통해 추가적으로 도출함으로써 투입과 산출을 모두 고려하는 것과 투입만을 고려하는 경우의 결과값을 비교하였다.

효율성 도출 결과 및 통계량은 Table 6과 같으며, 재래식 잠수함은 상어급 잠수함의 효율성 값이 100%로 우수한 것으로 확인되었다. 이는 상어급 잠수함의 톤 수와 전장이 다른 잠수함에 비해 월등히 작는데 비해 기동성 지수나

생존성 지수는 크게 뒤지지 않기 때문인 것으로 판단된다. 상어급 잠수함 외에도 우리나라의 장보고급 및 손원일급 잠수함도 비교적 우수한 효율성 값을 얻을 수 있었다.

원자력추진 잠수함의 경우 로스엔젤레스급 등 5개 클래스의 효율성 값이 100%로 우수한 것으로 확인되었다. 원자력추진 잠수함의 평균 효율성은 방향거리함수에서 약 83.95%로 재래식 잠수함의 약 69.08% 대비 14.87% 높았으며, CCR 모형에서는 약 80.82%로 재래식 잠수함의 약 62.64% 대비 18.82% 높았다. 방향거리함수 모형을 통해 얻은 재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함의 효율성 값 분포는 Fig. 3와 같다. 차트 중 상자의 아랫변에 해당하는 수치가 제1사분위수, 중간에 직선이 중앙값, 윗변이 제3사분위수를 의미하며, 회색 상자는 데이터의 50%가 분포하고 있다는 의미이다.

CCR 모형을 통해 효율성을 추가로 도출함으로써 방향거리함수에서의 결과값과 CCR 모형에서의 결과값의 효율성의 순위는 같지 않다는 것을 알 수 있었다. 만약 위 결

Table 6. 재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함의 효율성 분석결과

DMU		방향거리함수 모형		CCR 모형	DMU		방향거리함수 모형		CCR 모형
잠수함	클래스	β	전장	효율성 값	잠수함	클래스	β	전장	효율성 값
재래식 잠수함	정보고급	0.0159	98.41 %	96.86 %	원자력추진 잠수함	로스엔젤레스급	0	100 %	100 %
	손원일급	0.0690	93.10 %	87.08 %		오하이오급	0	100 %	100 %
	위스키급	0.2687	73.13 %	65.12 %		서울프급	0.1023	89.77 %	87.73 %
	로미오급	0.3994	60.06 %	53.11 %		버지니아급	0	100 %	92.23 %
	상어급	0	100 %	100 %		뱅크드급	0.3748	62.52 %	54.73 %
	송급	0.5444	45.56 %	43.89 %		트라팔가급	0.3248	67.52 %	56.50 %
	킬로급	0.5902	40.98 %	40.70 %		아스투트급	0.1362	86.38 %	84.70 %
	밍급	0.4272	57.28 %	57.45 %		루비스급	0	100 %	100 %
	위안급	0.2528	74.72 %	61.13 %		트리옹팡급	0.4074	59.26 %	62.01 %
	하루시오급	0.3188	68.12 %	51.65 %		바라쿠다급	0.2040	74.6 %	66.27 %
	유우시오급	0.3435	65.65 %	48.86 %		차크라급	0	100 %	100 %
	오야시오급	0.4804	51.96 %	43.17 %		아리한트급	0.3271	67.29 %	65.71 %
	평균	0.3092	69.08 %	62.64 %		평균	0.1606	83.95 %	80.82 %
	표준편차	-	19.80 %	20.91 %		표준편차	-	16.27 %	18.42 %

과와 같은 효율성 값을 참고하여 새로운 클래스의 잠수함을 연구개발한다면 투입만 개선할 것인지 투입, 산출 모두를 개선할 것인지 여부에 따라 모형을 선택할 수 있음을 알 수 있다.

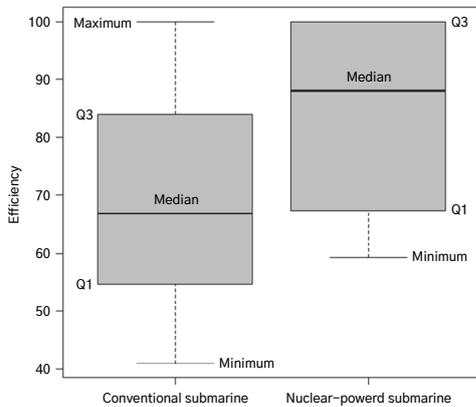


Fig. 3. 재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함의 효율성 분포

위 모형에서 얻은 결과값이 통계적으로 유의한지 확인하기 위해 윌콕슨-만-위트니 검정을 실시하였다. 흔히 서로 다른 두 그룹에 대한 평균과 같은 특정 모수를 비교할 때 자주 사용되는 방법은 t -검정법이지만, t -검정법은 표본이 t -분포를 따르고 있다고 가정하고 있기 때문에 효율성 평균값의 비교를 위해서는 사용할 수 없다. 왜냐하면 효율성 값은 통계적 분포에서 추출된 값이 아니기 때문이다. 따

라서 효율성 값의 평균 비교를 위해 비모수적 검정(non-parametric test approach)에 자주 사용하는 윌콕슨-만-위트니 검정법을 사용하였다.

윌콕슨-만-위트니 검정은 두 표본그룹의 원소들이 가지는 순위에 기반하여 그룹 간의 차이를 검정하는 방법으로, 본 연구에서의 가설설정은 다음과 같다.

$$\text{귀무가설}(H_0): \mu_{\text{conventional}} = \mu_{\text{nuclear}}$$

$$\text{대립가설}(H_a): \mu_{\text{conventional}} < \mu_{\text{nuclear}}$$

이때 $\mu_{\text{conventional}}$ 은 재래식 잠수함의 효율성 분석결과와 평균값이고, μ_{nuclear} 는 원자력추진 잠수함 효율성 분석결과와 평균값이다. R프로그램을 이용하여 위 가설설정에서 따른 단측검정을 실시하였으며, 검정결과 p -value가 0.03132로 0.05 유의수준에서 귀무가설을 기각하고, 원자력추진 잠수함의 효율성이 재래식 잠수함보다 높다는 대립가설을 채택하였다.

4.2 원자력추진 잠수함 간 효율성 비교

원자력추진 잠수함 간의 효율성 분석결과 평균은 약 80.75%, 표준편차는 약 23.10%였다. 클래스별 세부결과는 Table 7과 같으며, 해석의 용이를 위해 β 값을 100% 기준 효율성 값으로 환산하여 제시하였다.

Table 7. 원자력추진 잠수함 효율성 분석결과

구분	DMU		β	효율성 값	
	국가	클래스			
평가 대상군	미국	로스엔젤레스급	0	100 %	
		오하이오급	0	100 %	
		시울프급	0.5302	46.98 %	
		버지니아급	0.1323	86.77 %	
		뱅크드급	0.7323	26.73 %	
	영국	트라팔가급	0	100 %	
		아스튜트급	0.3273	67.27 %	
		루비스급	0	100 %	
	프랑스	트리옹팡급	0.1856	81.44 %	
		바라쿠다급	0.1887	81.13 %	
	인도	차크라급	0	100 %	
		아리한트급	0.7304	26.96 %	
	비평가 대상군	러시아	타이푼급	0.5322	46.78 %
			칼마급	0.4887	51.13 %
델핀급			0.3070	69.30 %	
시에라급			0	100 %	
슈카급			0.1203	87.97 %	
아쿨라급			0	100 %	
안테이급			0.0234	97.66 %	
콘도르급			0.0960	90.40 %	
브레이급			0.1506	84.94 %	
야센급			0.2225	77.75 %	
중국		한급	0.0458	95.42 %	
		상급	0	100 %	
		진급	0	100 %	
		평균		80.75 %	
표준편차		23.10 %			

평가대상군 중 효율성이 100%인 클래스는 로스엔젤레스급, 오하이오급, 트라팔가급, 루비스급, 차크라급 5개 클래스였으며, 선행연구에서 도입이 가능한 클래스로 지목되었던 버지니아급과 바라쿠다급도 비교적 높은 효율성 값을 달성하기는 하였지만, 효율성을 개선할 여지가 있는 것으로 확인되었다. 향후 원자력추진 잠수함을 도입하게 되어 버지니아급, 바라쿠다급과 같은 클래스를 획득하는 것을 고려한다면, 투입·산출 효율성을 개선하기 위한 노력을 통해 정성적인 판단과 정량적인 판단을 모두 충족시킬 수 있는 전력을 도입할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

본 연구에서는 한국형 원자력추진 잠수함 도입 시 벤치마킹 모델을 선정하는 정책적 의사결정 지원을 목적으로 1단계로는 방향거리함수 모형과 CCR 모형을 이용하여 재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함의 효율성을 비교하고, 2단계로 방향거리함수 모형을 이용하여 원자력추진 잠수함에 대한 효율성 분석을 수행하였다. 이를 위하여 잠수함의 작전요구성능을 대표할 수 있는 변수인 화력, 기동성, 생존성과 원자력추진 잠수함 도입 시 예상되는 국제적 마찰을 산출변수로 선정하였으며, 투입변수로는 톤수와 전장을 선정하였다.

재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함의 효율성 비교 결과로는 재래식 잠수함에서 69.08%, 원자력추진 잠수함에서 84.20%를 달성하였다. 이 결과값이 통계적으로 유의한지 확인하기 위해 윌콕슨-만-위트니 검정으로 0.05 유의수준에서 단측검정을 실시한 결과 p -value 0.03132로 원자력추진 잠수함의 효율성이 재래식 잠수함보다 높다는 결론을 얻을 수 있었다.

2단계로는 원자력추진 잠수함에 대해 효율성을 분석하였으며, 이때 실제 획득 가능성이 현저하게 낮은 클래스를 제외한 12개 클래스를 평가대상군으로 지정하였다. 결과적으로는 로스엔젤레스급, 트라팔가급 등 5개 클래스가 100% 효율성을 달성하였다. 이러한 정보는 우리가 원자력추진 잠수함을 도입하기로 결정하였을 때 정량적인 근거를 제시함으로써 정책결정을 지원할 수 있을 것으로 기대된다. 선행연구에서 도입이 가능한 클래스로 지목되었던 버지니아급과 바라쿠다급은 비교적 높은 효율성 값을 달성하기는 하였지만, 일부 효율성을 개선할 여지가 있는 것으로 확인되었다. 만약 버지니아급, 바라쿠다급과 같이 효율성 100%를 달성하지 못한 클래스의 도입을 고려한다면, 효율성 분석결과와 정보를 토대로 한 투입, 산출 효율성을 개선하기 위한 노력으로 정성적인 판단과 정량적인 판단을 모두 충족시킬 수 있는 전력을 도입할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 제한사항은 각 변수값을 정량적으로 산출하기 위해 이용한 정보가 한정적이라는 것이다. 국제적 마찰에는 우리나라 농축도만을 포함시켰는데, 대한민국은 원자력추진 잠수함을 도입하는데 있어 한·미 원자력협정의 양자 고위급 회담에서의 동의를 필요하며, 경우에 따라 한·미 원자력협정의 일부 개정이 필요하다. 이러한 상황에서 동일한 우리나라 농축도 조건 하에서는 미국의 원자력추진 잠수함

을 도입할 경우 국제적 마찰을 줄일 수 있을 것이라 판단되지만, 이를 변수에 포함시키는 것이 제한되어 고려하지 못하였다. 또한, 원자력추진 잠수함 도입시 쟁점사항이 되는 경제적인 분야를 변수로 포함하고자 하였으나, 예산에 대한 정보가 제한적이어서 이를 반영하지 못하였다. 건조예산이나 우라늄 농축도에 따른 핵연료 교체를 위한 소요비용 등을 모델에 포함시킨다면 보다 정교한 값을 얻을 수 있을 것이라 기대된다. 이러한 정보를 모델에 포함시킬 수 있는 방안은 향후 연구를 통해 해결해야 할 과제이다.

참고문헌

- [1] 장진오·정제령, “북한 SLBM 위협에 대비한 원자력추진 잠수함의 효율성 검토,” 주간국방논단(8월 21일), pp. 1-8, 2017.
- [2] 박재완, “상쇄전략과 4차 산업혁명 기술혁신을 적용한 북핵 대응방안,” 한국과 국제사회, 3(1), pp. 77-106, 2019.
- [3] 황재연, “제362원자력 잠수함사업 & 한·미 원자력 협력협정,” 밀리터리 리뷰, 6, pp. 55-61, 2015.
- [4] 문근식, “왜 핵추진 잠수함인가?,” 서울, 플래닛미디어, 2016.
- [5] 이동균·박승주·이진호, “원자력추진 잠수함 최소소요량 결정을 위한 임무 할당 최적화 모델,” 한국군사과학기술학회지, 21(2), pp. 235-245, 2018.
- [6] 서상규, “중급국가의 원자력추진체계 확보요인과 그 함의에 관한 연구: 전략자산으로서의 잠수함을 중심으로,” 한남대학교 박사학위 논문, 2015.
- [7] 송상훈, “한국해군의 잠수함전력 건설방향: 원자력추진 잠수함을 중심으로,” 합동군사대학교 합동참모대학 졸업 논문, 2018.
- [8] 채원석, “원자력선 기관,” 서울, 영문출판사, 1992.
- [9] 임한규, “왜 핵추진 잠수함 확보가 절실한가,” 국방과 기술 (12월 1일), pp. 48-53, 2017.
- [10] Seiford, L.M., and Zhu, J., “Modeling Undesirable Factors in Efficiency Evaluation,” *European Journal of Operational Research*, 142(1), pp. 16-20, 2002.
- [11] 고길곤, “효율성 분석 이론,” 고양, 도서출판 문우사, 2017.
- [12] Tone, K., “A Slacks-based Measure of Efficiency in Data Envelopment Analysis,” *European Journal of Operational Research*, 130(1), pp. 498-509, 2001.
- [13] Tone, K., “Dealing with Undesirable Outputs in DEA: A Slacks-Based Measure (SBM) Approach,” *European Journal of Operational Research*, pp. 1-16, 2004.
- [14] 이정동·오동현, “효율성 분석 이론,” 서울, 지필미디어, 2012.
- [15] George, H., and Kleoniki Natalia, P., “A Critical Review of the Main Methods to Treat Undesirable Outputs in DEA,” *Munich Personal RePEe Archive*, 90374, pp. 1-21, 2018.
- [16] 조영빈, “군 핵잠수함 프랑스 바라쿠다급으로 자체 개발 가닥,” 한국일보, <https://www.hankookilbo.com/News/Read/201803160427640519>, (검색일: 2021. 1. 6.), 2018.
- [17] 최종수, “한국형 원자력추진 잠수함의 필요성과 확보방안,” *전투발전연구*, 26, pp. 40-86, 2019.
- [18] 오미영·김성수, “사고 및 대기오염 비용을 고려한 서울 시내버스업체의 효율성 분석,” *대한교통학회지*, 28(4), pp. 157-166, 2010.
- [19] 김재현, “장기손해보험의 유해산출물을 고려한 손해보험회사의 효율성 연구,” *한국리스크관리학회지*, 25(1), pp. 3-26, 2014.
- [20] 신정훈·황승준, “방향거리함수를 이용한 자동차 부품기업의 재무효율성 측정,” *한국경영학회지*, 46(5), pp. 1427-1444, 2017.
- [21] 장준섭, “원자력추진 잠수함에 대한 이해 100문 100답,” 진해, 국군인쇄창, 2017.
- [22] 김지훈·이준주, “전투함의 구조적 효율성 분석을 위한 AHP/DEA-AR 모형 설계,” *한국국방경영분석학회지*, 45(1), pp. 59-72, 2019.
- [23] 김종형, “대안적 분석모형에 의한 탈냉전 이후 동북아 재래식 전력지수 평가,” *국방대학교 석사학위 논문*, 2011.