



Received: 2021/01/12
Revised: 2021/02/19
Accepted: 2021/03/02
Published: 2021/03/29

***Corresponding Author:**

Ji-Hoon Kim

E-mail: navy8113265@gmail.com

TFDEA를 이용한 해양무인체계 (USV/UUV) 기술예측에 관한 연구

A Study on Technology Forecasting of Unmanned Maritime Vehicles (USV/UUV) Using TFDEA

김지훈*

해군소령, 해군 1함대 광개토태양함 작전관

Ji-Hoon Kim*

Lieutenant Commander/Operation Officer, Gwanggaeto The Great,
1st Fleet ROK Navy

Abstract

본 논문에서는 비모수적이고 비통계적 기술예측 방법인 TFDEA를 이용하여 미국의 무인수상정 12종과 무인잠수정 22종에 대한 연간 평균 기술변화율을 측정하고, 이를 토대로 우리 군의 무인수상정 해검과 2022년 출시 예정인 무인잠수정 ASWUUV의 출시시기에 대한 기술예측을 실시하였다. 이러한 기술예측 결과는 향후 연구개발 사업 시 기술성숙도 판단이나 작전요구성능 설정에 필요한 정량적 자료를 제공하는데 기여할 수 있을 것이다.

This study measure the annual average technological rate of change for 12 U.S. unmanned surface vehicles and 22 U.S. unmanned underwater vehicles using TFDEA, a non-parametric and non-statistical technology prediction method. Also technology forecasting was conducted for the release date of ROK Navy's USV "Sea-Sword" and UUV "ASWUUV" which is scheduled to be released in 2022. These technology forecasting results could contribute to providing quantitative data necessary for judging technical maturity and setting required operational capability(ROC) for future research and development projects.

Keywords

기술예측(Technology Forecasting),
자료포락분석(Data Envelopment Analysis),
자료포락분석 기반 기술예측(TFDEA),
해양무인체계(Unmanned Maritime Vehicles)

1. 서론

2016년 1월 다보스포럼에서 핵심의제로 다루어진 4차 산업혁명은 디지털 기기와 인간, 물리적 환경의 융합으로 다양한 학문과 전문 영역의 경계를 넘어 '파괴적 혁신(disruptive innovation)'을 일으킬 것으로 기대된다. 이러한 과학기술의 발전은 전쟁 패러다임의 변화를 이끌어내고 있으며 그 중 무인전투체계는 기존 전장에서는 볼 수 없었던 새로운 개념의 무기체계로서 미래전을 주도할 게임체인저급의 잠재력이 있다고 여겨져 세계 각국에서 개발이 진행되고 있다.

무인전투체계와 같은 신개념의 무기체계를 적시에 효율적으로 개발하기 위해서는 기술예측을 통한 객관적이고 정량적인 분석 결과를 바탕으로 국방기술수준의 현주소를 판단한 뒤, 올바른 방향으로 국방연구개발사업의 계획과 투자가 이루어지도록 하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 기술예측 방법론 중 하나인 TFDEA(technology forecasting using data envelopment analysis)를 이용해 해양무인체계 기술의 최고선진국인 미국의 무인수상정과 무인잠수정에 대한 기술변화율을 분석하고, 이를 토대로 우리 군의 무인수상정 해검과 2022년 개발 예정인 무인잠수정 ASWUUV의 출시시기에 대한 기술예측을 실시하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 TFDEA 기술예측 모형

TFDEA 기법은 효율성 분석 모형인 자료포락분석(DEA, data envelop-

ment analysis)을 확장하여 기술예측이 가능케 한 방법론으로, 2001년 Anderson et al.(2001)[1]이 PICMET '01 (Portland International Conference for Management of Engineering and Technology '01)에서 기업의 데이터베이스 시스템에 대한 기술예측에 관한 연구로 처음 학계에 소개하였다.

기존에 흔히 기술예측 방법론으로 사용되었던 회귀분석은 기술의 혁신적 변화에 대한 예측의 한계와 단일 사양에 대해서만 분석이 가능하다는 한계가 있었지만, TFDEA의 경우 DEA를 기반으로 하므로 다수투입-산출에 대한 자료 적용이 가능하며, 또한 연도별 출시된 제품 중 효율성 분석을 통해 가장 최고 수준의 기술을 갖는 제품을 SoA(state of art: 출시 당시 최고기술이 적용된 상태)로 판단하고 각 SoA의 변화에 따른 기술변화율을 예측함으로써 회귀분석과 같은 전통적인 계량방법론 대비 향상된 예측력을 보인다는 장점이 있다[2].

TFDEA 기술예측 모형은 하이브리드 자동차, DSLR 카메라 등 다양한 산업분야의 기술예측에 점차 활용되었으며, 이후 무기체계 영역까지도 확장되어 2006년 Inman et al.(2006)[3]의 전투기에 대한 기술예측 연구를 시작으로 주력전차, 무인항공기 성능에 대한 기술예측과 같은 다수의 연구가 활발히 진행되고 있다.

TFDEA 기술예측은 2단계로 구분된다. 1단계는 최초 출시되는 시점에 SoA였던 제품이 시간 흐름에 따라 비효율적으로 변화되는 것을 바탕으로 기술변화율(RoC, technological rate of change)을 측정하고, 2단계에서는 1단계에서 측정된 기술변화율을 바탕으로 측정하고자 하는 대상의 출시시기를 예측한다.

회귀분석을 이용한 기술예측 연구들은 오래전부터 이루어져 왔지만, TFDEA를 이용한 기술예측 연구는 상대

적으로 역사가 짧은 편이다. 따라서 주로 다양한 산업 분야의 기술예측에 TFDEA가 적용될 수 있음을 확인하거나 TFDEA와 회귀분석의 결과 비교를 통해 TFDEA의 예측력이 우수함을 입증하는 형태의 연구가 주로 진행되어 왔다[4]. TFDEA 기술예측 모형을 활용한 국방분야의 주요 기술예측 연구 현황은 Table 1과 같다.

2.2 해양무인체계 개발동향

해양무인체계는 미래 전투 환경에서 인명 손실을 최소화 하면서 전투력 우위를 확보하기 위해 네트워크중심전에 적합한 자율제어 기반의 무인 플랫폼으로 운용되는 체계로서, 해양 무인전투체계의 경우 작전구역에 따라 수상에서 작전을 수행하는 무인수상정(USV, unmanned surface vehicle)과 수중에서 작전을 수행하는 무인잠수정(UUV, unmanned underwater vehicle)으로 구분된다[5].

이러한 해양무인체계는 기존의 유인 플랫폼과 차별화된 다양한 장점을 지닌다. 대표적으로, 3D(the dull, the dirty, and the dangerous: 지루하고 더럽고 위험한) 임무가 많은 해군작전의 특성상 전투원의 피로도를 경감하고 생존성을 보장하는 동시에 신속하고 과감한 작전을 가능케 한다. 특히, 기뢰 소해나 심해작전, 적의 해안포나 대함미사일 위협이 존재하는 연안 정찰과 같은 3D 작전 시 유·무인체계간 협업을 통해 작전 효율성을 크게 향상시킬 수 있다. 또한, 저비용·고효율 무기체계로서 유인 플랫폼 대비 획득비와 운용비가 저렴하다는 특징으로 벌떼 작전(drone swarm)과 같은 새로운 전술이나 미 해군의 유명함대(ghost fleet)와 같은 전력구성 개념들이 등장하는 기반이 되고 있다.

지난 10여 년간 미군의 주요 전투 사례를 살펴보면 무인항공기의 사용은 단 몇 회에서 5,000회 이상으로 증가했으며, 무인지상차량은 0에서 12,000회 이상 폭발적으로 증가하였다. 그리고 이러한 무인체계의 유용성을 바탕으로 해양무인체계의 사용 또한 점차 증가하고 있는 추세이다[6]. 이러한 해양무인체계의 등장은 불과 10여년 전에는 존재하지 않았던 새로운 전략적, 전술적 가능성을 창출하고 있으며, 이제는 4차 산업혁명의 첨단 기술을 기반으로 더 이상 전장의 보조 역할에 머무르지 않고 게임체인저 수준의 역할까지 넘보고 있어 다수의 국가에서 개발이 진행 중이다. 2015년 기준 각 국가별 해양무인체계 기술수준과 2018년 기준 최고선진국인 미국의 주요 해양무인체계 개발동향은 Tables 2-3과 같다[7,8].

Table 1. TFDEA 국방분야 기술예측 선행연구 현황

연구자	연도	기술예측 대상
Inman et al.	2006	미국 전투기(1944~1982년) 성능
김재오 외	2007	주력전차 성능
Lim et al.	2014	전투기 성능
김현철 외	2014	미국 · 소련 · 러시아 전투기 성능
김현철	2014	무인항공기 및 지상무인체계 성능
정병기 외	2016	무인항공기 성능
최성규	2018	무인항공기 성능
김지훈 외	2019	무인잠수정 성능

Table 2. 주요국 해양무인체계(USV, UUV) 기술수준(2015)

	국가	기술 수준 현황 (%)*	
선진권	미국	100	
	영국	92	
	프랑스	91	
	독일	89	
	일본	87	
	노르웨이	87	
	스웨덴	86	
	캐나다	83	
	러시아	81	
	중국	80	
	이스라엘	80	
	중진권	한국	79
		이탈리아	79
호주		76	
스페인		74	
인도		71	
후진권	남아공	65	
	터키	63	

*미국 기술 수준을 100 %로 놓고 산정

Table 3. 미국 주요 해양무인체계 개발동향(2018)

구분	주요체계	획득단계	주요 연구기관/업체
무인 수상정	Z-Boat 1800	전력화	Bluefin Robotics Boeing Electric Boat GDRS Hydroid Lockheed Martin Manne Advanced Research NAVSEA ONR
	USV-1000	전력화	
	WAM-V	전력화	
	Blackfish	전력화	
	Sea OWL	전력화	
	USSV-HS	개발중	
	NMRS	전력화	
무인 잠수정	LMRS	전력화	Northrop Grumann Naval Undersea Warfare Center SeaRobotics Raytheon
	21'' MRUUV	개발중	
	MANTA	개발완료	
	Bluefin-12	전력화	
	Bluefin-21	전력화	
	REMUS-600	전력화	
Echo Voyager	전력화		

해양무인체계 기술의 최고선진국인 미국은 Navy Master Plan에 따라 체계적이고 단계적으로 연구개발을 추진 중이다. 특히 대기뢰전, 감시정찰 및 대함전과 대잠전, 그리고 특수전까지 다양한 분야에 대한 연구개발과 전력화를 위

한 실험역 시험을 지속적으로 수행하고 있다. 국방기술품질원에서 발간한 2018년 국가별 국방과학기술수준조사서에 따르면, 미국은 지속적으로 해양무인체계 기술분야의 최고 기술 수준을 유지 중이며, 우리나라의 해양무인체계 기술 수준은 2018년 기준으로 미국 대비 약 77%인 중진권(세계 12위) 수준이다[9].

해양무인체계와 같은 무인체계 분야는 운용개념이 다양하고 기술발전의 속도가 빠르다. 따라서 현재 기술수준에서 과도하지 않은 작전운용성능(ROC)을 설정하여 원하는 시기에 가격 경쟁력 있게 개발하는 것이 중요한 요소이며, 여기에 기술예측이 더욱 유용하게 활용될 수 있다. 선진국의 기술수준을 파악하고 이를 토대로 중장기 획득예상 무기체계의 소요기술에 대한 기술예측이 이루어진다면 향후 해양무인체계의 연구개발에 정량적인 참고자료를 제공하는 측면에서 기여할 수 있을 것이다.

3. 실증분석

3.1 분석 자료 및 변수 선정

무인수상정과 무인잠수정에 관련된 분석 자료는 국방기술품질원의 DTiMS(Defense Technology Information System)에 탑재되어있는 JDDS(Jane's Defence Data Service) 자료를 주로 하고, 일부 JDDS에서 누락된 부분은 제작사 플랫폼 등의 자료를 활용하였다. JDDS에서 제공되는 자료 중 성능관련 수치가 모두 포함되어 기술예측 분석이 가능한 미국 무인수상정 12종(1994년~2014년 출시)과 미국 무인잠수정 22종(1988년~2016년 출시)을 대상으로 기술변화율을 측정하고, 이를 토대로 우리 군의 무인수상정 해검과 2022년 출시 예정인 무인잠수정 ASWUUV의 출시시기에 대한 기술예측을 실시하였다.

본 연구에서는 TFDEA 분석 시 SoA의 개념과 해양무인체계의 기술성능 연구에 관심을 두고 가변규모수익(VRS) - 산출(output) 기준 DEA 모형을 사용하였다. 투입변수는 다수의 무인체계 기술예측 관련 선행연구와 동일한 상수 '1'을 사용하였으며, 이는 해양무인체계의 개발이 정상적으로 이루어졌음을 의미한다. 산출변수는 분석 자료의 가용제원 중 해양무인체계의 주요 속성을 나타낼 수 있는 중량(weight), 운용시간(endurance), 최대속도(max speed)를 선정하였으며, 무인잠수정의 경우 최대잠함심도(max depth rate)를 산출변수에 추가하였다. 이러한 변수 선정에는 선행연구에서 사용된 변수와 동일하거나 유사한 변

수들을 고려하였으며, 또한 DEA 모형의 특성상 분석 대상의 개수 대비 적정 변수의 개수가 존재하는 점도 반영하였다[10]. 연구모형과 각 변수에 대한 기술통계량은 Fig. 1 및 Table 4와 같다.

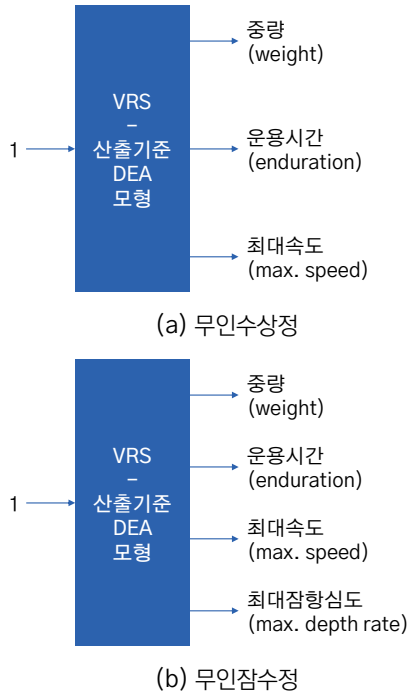


Fig. 1. TFDEA 분석 모형

Table 4. 분석 자료의 산출변수별 기술통계량

구분	산출변수	평균	표준편차	최소값	최대값
무인수상정	중량(kg)	2,788.2	3,316.6	38	9,750
	운용시간(h)	134.46	411.25	4	1,440
	최대속도(kn)	27.417	14.75	8	50
무인잠수정	중량(kg)	4,442.55	9,695.24	35	45,360
	운용시간(h)	128.05	455.11	2	2,160
	최대속도(kn)	4.64	2.21	1.3	10
	최대잠항심도(m)	3,573.05	3,011.1	60	11,000

3.2 무인수상정 기술예측 결과

3.2.1 기술변화율 측정 결과

1994년부터 2014년 사이 출시된 미국 무인수상정의 기술변화율 측정 결과, 2014년 기준 총 12종 중 3종의 무인수상정이 SoA에서 non-SoA로 변화한 것으로 식별되어 기술변화율 측정에 사용되었다. 나머지 6종은 출시 시점부터

non-SoA이어서 분석 대상에서 제외하였고, 3종은 2014년까지 SoA로 남아있어서 기술변화율 측정이 제한되었다. 미국 무인수상정의 기술변화율 측정 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. 미국 무인수상정 기술변화율(RoC) 측정 결과

DMU	제품명	FY(t_k)	ϕ^{SE,t_f}	t_{eff}	γ^t
S1	Sea OWL	1994	1.2201	2008	1.01422
S2	Spartan Scout	2003	1.3573	2007	1.06666
S3	USSV HTF	2005	1.4210	2006	1.38516
평균기술변화율($\bar{\gamma}$)					1.15535

Table 5에서 $FY(t_k)$ 는 제품의 최초 출시연도(first year)를 의미하며, ϕ^{SE,t_f} 는 2014년 기준 효율성, t_{eff} 는 2014년 생산변경을 기준으로 추정된 유효시간(effective time), γ^t 는 각 무인수상정들의 기술변화율을 의미한다. 분석 결과 위 3개의 제품 모두 최초 출시시에는 SoA였으나 2014년 기준으로는 모두 non-SoA로 확인되었으며, 각각의 기술변화율을 토대로 미국 무인수상정의 연간 평균기술변화율($\bar{\gamma}$)을 측정한 결과는 1.15535, 즉 연간약 15.54 %로 측정되었다.

3.2.2 기술예측 결과

기술예측은 TFDEA 분석의 1단계에서 측정된 연간 평균 기술변화율($\bar{\gamma}$)에 따른 경과시간을 아래의 식 (1)을 적용하여 측정한다[3].

$$t_{expected} = t_{eff} + \ln(1/\phi^{SE,t_f}) \ln(\bar{\gamma}) \quad (1)$$

앞서 측정된 기술변화율을 바탕으로 2017년에 출시된 우리 군의 무인수상정인 해검에 대한 기술예측을 실시하였다. 해검은 항만 주변 또는 해상 임무구역에 대한 감시 및 정찰임무를 수행하는 연안 감시정찰용 무인수상정이다. 해검에 대한 기술예측 결과는 Table 6과 같다.

Table 6. 무인수상정 해검 기술예측 결과

제품명	FY(t_k)	ϕ^{SE,t_f}	t_{eff}	예측결과
해검	2017	1.1698	2007.37	2006

Table 6에서 ϕ^{SE,t_f} 는 초효율성 값을 의미하며, t_{eff} 는 2014년 생산변경 기준유효시간이다. 기술예측 결과($t_{expected}$)는 연간 평균기술변화율($\bar{\gamma}$)을 적용하여 예측한 최초 출시연

도를 의미한다. 해검의 경우 최초 출시시점에 초효율성 값이 1.165로 이미 SoA(미국의 최고 기술수준 기준)가 아닌 상태였으며, 이로 인해 미국의 기술변화율을 토대로 예측된 출시 시기는 최초 출시 시기인 2017년보다 빠른 2006년으로 분석되었다. 즉, 미국의 무인수상정 기술수준으로 보았을 때 해검의 출시시점은 2006년으로 약 11년의 기술 격차를 보였다.

3.3 무인잠수정 기술예측 결과

3.3.1 기술변화율 측정 결과

1988년부터 2016년 사이 출시된 미국 무인잠수정의 기술변화율 측정 결과, 2016년 기준 총 22종 중 7종의 무인잠수정이 SoA에서 non-SoA로 변화한 것으로 식별되어 기술변화율 측정에 사용되었다. 나머지 12종은 출시 시점부터 non-SoA이어서 분석 대상에서 제외하였고, 3종은 2016년까지 SoA로 남아있어서 기술변화율 측정이 제한되었다. 미국 무인잠수정의 기술변화율 측정 결과는 Table 7과 같다.

Table 7. 미국 무인잠수정 기술변화율(RoC) 측정 결과

DMU	제품명	FY(t_k)	$\phi^{SE,t}$	t_{eff}	γ^t
U1	Sea Squirt	1988	3.3246	1999.24	1.11285
U2	AUSS	1992	1.1006	2003.49	1.00837
U3	ABE	1993	2.1692	2006.21	1.06037
U4	Odyssey 3	2000	1.4259	2003.39	1.11051
U5	REMUS 6000	2001	1.1407	2003.36	1.05740
U6	Echo Ranger	2002	1.2753	2002.69	1.42430
U7	SAUVIM	2005	1.4668	2006.98	1.21307
평균기술변화율($\bar{\gamma}$)					1.14098

분석 결과 위 7개의 제품 모두 최초 출시시에는 SoA였으나 2016년 기준으로는 모두 non-SoA로 확인되었으며, 각각의 기술변화율을 토대로 미국 무인잠수정의 연간 평균 기술변화율($\bar{\gamma}$)을 측정된 결과는 1.14098, 즉 연간 약 14.1%로 측정되었다.

3.3.2 기술예측 결과

측정된 기술변화율을 바탕으로 2022년에 출시 예정인 우리 군의 무인잠수정인 ASWUUV에 대한 기술예측을 실시하였다. ASWUUV는 모함에서 진수되어 적 해역에 전개

한 뒤, SONAR를 이용해 적 잠수함에 대한 정찰 및 감시 임무를 수행하며 아군 자산에게 정보를 전송하는 개념으로 개발 중인 대잠전용 무인잠수정이다. ASWUUV에 대한 기술예측 결과는 Table 8과 같다.

Table 8. 무인잠수정 ASWUUV 기술예측 결과

제품명	FY(t_k)	$\phi^{SE,t}$	t_{eff}	예측결과
ASWUUV	2022	1.3047	2006.805	2004.788

기술예측 결과 ASWUUV의 경우 최초 출시시점에 초효율성 값이 1.305로 이미 SoA가 아닌 상태였으며, 이로 인해 미국의 기술변화율을 토대로 예측된 출시 시기는 최초 출시 시기인 2022년보다 빠른 2004년으로 분석되어 약 18년의 격차를 보였다.

4. 결론

본 연구는 TFDEA 기술예측 모델을 이용하여 해양무인체계 기술의 최고선진국인 미국의 무인수상정 12종과 무인잠수정 22종에 대한 기술변화율을 각각 측정하고, 이를 토대로 우리 군의 무인수상정 해검과 2022년 출시 예정인 무인잠수정 ASWUUV에 대한 기술예측을 실시하였다. 연구 결과, 미국의 무인수상정과 무인잠수정의 연간 평균 기술변화율은 각각 15.54%, 14.1%로 측정되었으며, 무인수상정 해검과 무인잠수정 ASWUUV는 미국의 기술수준으로 보았을 때 모두 출시시점에 non-SoA상태로 최초 출시(예정)시기보다 빠른 2006년(해검)과 2004년(ASWUUV)의 결과를 도출하였다.

국방기술품질원의 국방과학기술수준조사서에 따르면, 우리나라의 해양무인체계 기술수준은 최선진국인 미국을 100으로 보았을 때 2010년 79%, 2012년 81%, 2015년 79%, 2018년 77%(세계 12위)로 아직 그 격차가 상당하다. 본 연구의 기술예측 결과에서도 미국 해양무인체계의 연간 기술변화율이 10% 이상이며, 이를 기준으로 평가한 해검과 ASWUUV와 같은 해양무인체계에 10~18년의 기술격차가 존재함을 보였다.

우리 해군은 해양무인체계의 기술격차를 줄이고 기술선진국으로 도약하고자 2018년부터 ‘해양무인체계 발전 TF’를 출범하고 산학연간 기술교류 협업을 추진하여 핵심기술 소요제기와 운용개념을 정립해 나가는 동시에, 해양무인체계 획득과 연계하여 조직, 교리·교범, 교육훈련, 물자, 시설

등 전투발전요소도 체계적으로 준비해나가며 smart navy 구현에 역량을 결집하고 있다. 해양무인체계를 비롯한 일반적인 무기체계의 개발은 현재 운용 중인 무기체계보다 기술적 우위를 가져야 하며, 적시에 전력화하기 위해 과도한 성능을 설정하지 않도록 하는 것이 중요하다. 이러한 측면에서 TFDEA를 통한 기술예측 방법론은 기술성숙도 판단이나 작전요구성능 설정에 필요한 정량적인 자료를 제공하는 데 기여할 수 있으며, 모형 특성상 SoA 대상을 식별할 수 있다는 점에서 연구개발 시 기술적 특성을 참고하여 개발할 수 있는 벤치마킹 대상을 선정하는데에도 활용될 수 있다.

본 연구는 자료의 한계로 인해 해양무인체계의 hardware 성능 위주로 기술예측을 실시하였으나, 해양무인체계는 자율 표적인식, 자율운항, 군집제어 및 각종 센서기술과 같은 software 요소기술의 비중도 상당하므로 향후 이러한 기술영역을 정량화하여 변수화하는 방안에 관한 연구가 필요하겠다. 분석 대상에 따른 다양한 핵심기술에 대한 변수 선정이 이루어진다면 더욱 효용성 높은 기술예측 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Anderson et al., "Assessing the Rate of Change in the Enterprise Database System Market Over Time Using DEA," Technology Management in the Knowledge Era. PICMET, 2001.
- [2] 정병기 외, "TFDEA를 이용한 무인항공기 기술예측에 관한 연구," 기술혁신학회지, 19(4), p.802, 2016.
- [3] Inman et al., "Predicting US Jet Fighter Aircraft Introductions from 1944 to 1982: A Dogfight between Regression and TFDEA," Technological Forecasting and Social Change, 73(9), pp. 1178-1187, 2006.
- [4] 최성규, "TFDEA를 적용한 군사용 무인항공기 기술예측에 관한 연구," 석사학위논문, 국방대학교, 논산, p.35, 2018.
- [5] 국방기술품질원, "2019 국방과학기술조사서 제7권 함정무기체계," 국방기술품질원, 서울, p. 88, 2019.
- [6] George Galdorisi, "Keeping Humans in the Loop," U.S.Navy Proceedings Magazine, Vol. 141, 2015.
- [7] 국방기술품질원, "2015 국가별 국방과학기술수준조사서," 국방기술품질원, 서울, p. 364, 2015.
- [8] 국방기술품질원, "2018 국가별 국방과학기술수준조사서," 국방기술품질원, 서울, p. 102, 2019.
- [9] 국방기술품질원, 상계서, p. 396.
- [10] W. W. Cooper et al., "Data Envelopment Analysis: a comprehensive text with models, applications, reference and DEA-Solver software," Kluwer Academic Publishers, Norwell, 2000.
- [11] 김재오 외, "DEA 기반 순위선정 절차를 활용한 주력전차의 기술예측방법 비교연구," 한국국방경영분석학회지, 33(2), 2007.
- [12] Lim et al., "Choosing Effective Dates from Multiple Optima in Technology Forecasting Using Data Envelopment Analysis(TFDEA)," Technological Forecasting and Social Change, 88, 2014.
- [13] 김현철 외, "TFDEA를 이용한 무기체계 기술예측에 관한 연구," 한국경영학회 2014년 통합학술대회 발표논문집, 2014.
- [14] 김현철, "TFDEA를 이용한 UAV와 UGV 기술예측 연구," 석사학위논문, 국방대학교, 논산, 2014.
- [15] 김지훈 외, "TFDEA를 이용한 무인잠수정(UUV) 기술예측에 관한 연구," 2019 한국군사과학기술학회 추계학술대회 발표논문집, 2019.