

함정의 다기능레이더(MFR) 자원할당 방안에 관한 연구

박영만 · 이진호 · 조현진 · 박경주 · 김하철 · 임요준 · 김해근 · 이호철 · 정석문[†]

A Study on Resource Allocations of Multi Function Radar in a Warship

Young-Man Park · Jinho Lee · Hyunjin Cho · Kyeongju Park · Ha-Chul Kim · Yo-Joon Lim ·
Haekeun Kim · Hochul Lee · Suk-Moon Chung[†]

ABSTRACT

A warship equipped with Multi Function Radar(MFR) performs operations by evaluating the degree of threats based on threats' symptom and allocating the resource of MFR to the corresponding threats. This study suggests a simulation-based approach and greedy algorithm in order to effectively allocate the resource of an MFR for warships, and compares these two approaches. As a detection probability function depending on the amount of allocations to each threat, we consider linear and exponential functions. Experimental results show that both the simulation-based approach and greedy algorithm allocate resource similarly to the randomly generated threats, and the greedy algorithm outperforms the simulation-based approach in terms of computational perspective. For a various cases of threats, we analyze the results of MFR resource allocation using the greedy algorithm.

Key words : Multi Function Radar(MFR), Resource Allocation, Simulation, Greedy Algorithm, Warship

요약

다기능레이더(MFR)를 장착한 함정의 작전수행은 적의 위협에 대한 징후를 바탕으로 위협의 정도를 판단하고 이를 바탕으로 MFR 자원을 위협별로 할당하는 것으로 작전을 시작한다. 본 연구는 MFR 탐지체계를 가진 함정의 임무 시작 시 필요한 위협별 MFR 자원할당 문제에 대하여 시물레이션을 이용한 기법과 Greedy 기법을 이용한 MFR 자원할당 방안을 제시하여 그 결과를 비교분석하였다. 분석시 자원할당에 따른 탐지확률 함수가 선형인 경우와 지수형인 경우를 고려하여 실험을 수행하였다. 실험 결과 시물레이션 기법과 Greedy 기법의 결과는 서로 비슷한 자원할당 결과를 보여주고 있으며, Greedy 기법은 시물레이션 기법에 비하여 그 수행시간이 아주 짧아 실제 임무 수행 시에 이용 가능한 기법으로 판단된다. 여러 가지 위협의 정도에 대해 Greedy 기법을 이용하여 MFR 자원할당 결과를 분석하였다.

주요어 : 다기능레이더(MFR), 자원할당, 시물레이션, Greedy 기법, 함정

1. 서론

함정의 전투체계는 각종 센서 및 무장 등 많은 체계들이 유기적으로 연결되어 해상에서 전투를 수행하는 복합 체계(system of systems)이다. 그뿐만 아니라 첨단 과학 기술의 발전과 함께 각각의 체계는 갈수록 고도화, 정밀

화되고 있으며, 이러한 복합체계를 효율적으로 통제하고 효과적으로 운용하기 위해서는 운용자의 영향이 매우 큰 의사결정 중심의 시스템이라고 할 수 있다(Lee et al., 2018).

복합체계로 구성된 함정의 여러 체계 중 센서를 통한 최초 탐지를 통해 이 후 단계에서 전투수행을 지속적으로 가능하게 하는 탐지체계의 역할은 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 함정의 탐지체계는 크게 소나 및 레이더 체계로 구분될 수 있다. 소나는 수중에서 함정, 잠수함 및 어뢰 등이 방사하는 음향을 탐지하는 것이며, 레이더는 대함 및 대공 표적에 대한 탐지·추적을 통해 위협이 되는 표적을 지속해서 감시하고 제거하기 위한 정보를 제

* 본 논문은 국방과학연구소서 연구비를 지원받아 연구하였음(관리번호 UD170019DD)

Received: 31 December 2018, Revised: 14 March 2019,
Accepted: 20 March 2019

[†] Corresponding Author: Suk-Moon Chung

E-mail: linosmchung@gmail.com

Dept. of Weapon System Eng. ROK Naval Academy

공하는 체계이다.

함정의 탐지체계 중에서도 레이더에 대해 살펴보면, 레이더는 과거 기계식의 회전형 레이더에서부터 수동 위상배열 레이더를 거쳐 오늘날의 전자주사식 능동 위상배열 레이더(AESA: Active Electronically Scanned Array)로 발전되어 오고 있으며, 위상배열 레이더는 기계적인 회전 없이 레이더에서 방사하는 전자파를 위상값을 조절하여 원하는 탐색 위치로 빔을 조향하면서 표적을 탐지한다(Lee et al., 2014). 또한, 하나의 레이더가 하나의 기능만을 수행하는 방식에서 현재는 단일 레이더에서 모든 기능을 수행하는 다기능레이더(MFR: Multi Function Radar, 이하 MFR)로 진보되고 있다(Jeong et al., 2014). 최근 한국해군에서도 호위함 함정에 도입을 추진하고 있고, 방위산업체에서도 활발한 연구가 진행되고 있다(Agency for Defense Development, 2018).

다기능레이더와 관련한 최근의 선행연구로써, 항공기용 다기능레이더의 성능평가를 위하여 항공기의 자세 기동을 고려한 다기능레이더/환경 통합 시뮬레이터를 구현하여 공대공 전투시나리오를 생성하여 시험 및 검증하는 연구가 수행되었다(Ko et al., 2017). 또한, 다수의 표적이 존재하는 전술 환경에서 레이더에서 수집한 정보로부터 표적에 대한 우선순위를 산출하는 인공신경망(Neural network) 모델을 구현하여 다기능레이더가 주요한 표적을 추적하고 레이더 자원을 효율적으로 관리하는 다기능레이더 표적 우선순위 할당에 관한 연구도 수행되었다(Jeong et al., 2018). 최근 고정형 우선순위 기법의 한계를 벗어나기 위해 퍼지 추론 등을 이용한 임무 우선순위의 선정 기법 등이 연구되어 표적에 대해 각기 다른 우선순위, 레이더 에너지, 추적시간 할당 등 임무별 최적화된 자원 관리를 수행하고 있다(Jeong, 2014; Kim et al., 2013).

본 연구에서는 최근 신형 수상함에 탑재되어 다양한 위협에 대한 탐지체계로 활용되고 있는 다기능레이더의 효율적인 운용방안에 관하여 연구하였으며, 특히, 함정 작전 수행 시에 가장 먼저 결정해야 하는 MFR 자원할당 문제에 대하여 MFR 자원할당량에 따른 탐지능력을 고려하여 함정생존율을 최대로 하는 효율적인 MFR 자원 할당 방법에 관하여 연구를 수행하였다. 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 MFR 운용 방안과 MFR 탐지 확률에 관한 기술과 MFR 자원할당에 대하여 시뮬레이션을 이용한 기법과 Greedy 기법을 활용한 방안을 제시하였다. 제3장에서는 제안된 두 가지 기법에 대하여 다른 형태의 탐지확률 함수를 활용한 수치실험을 수행하고 그

결과를 분석하여 여러 가지 특징을 제시하였다. 제4장에서는 연구 내용 전반에 대한 결론을 내리며 향후의 확장되어야 할 연구 주제를 제안하였다.

2. MFR 자원할당

2.1 MFR 운용 방안

MFR은 위상배열에 의한 전자스캔 레이더로 분류되는 레이더 체계이다. MFR은 그 기능이 탐색 또는 추적에 각각 제한되어있는 탐지 레이더 및 추적 레이더와는 달리 지형 및 기상 클러터 조건에서 고정익 항공기, 무인 항공기, 순항 유도탄, 공대지 유도탄, 전술 탄도탄 등의 다양한 표적을 동시에 탐색할 수 있는 능력과 다중 표적에 대한 정밀 추적을 수행함과 동시에 적아식별을 자동으로 수행한다(Jeong, 2014). MFR은 Fig. 1과 같이 다양한 기능을 가지는 다수의 임무를 신속하고 유동적으로 전환하며 처리할 수 있다. 그러나 이러한 다기능을 수행하는데 있어 한정된 시간 안에 신속히 대응해야 한다는 점과 레이더의 각 임무가 처리되는 시점에 따라 표적의 탐지율과 추적 성능이 결정되므로, 임무들이 수행될 시간과 순서를 효율적으로 결정할 필요성이 상존한다. 따라서 임무를 어떠한 순서와 빈도로 처리하고 레이더의 자원을 어떻게 효율적으로 분배할 것인가 하는 문제가 대두되고 있다. MFR에서 관리해야 할 주요 자원은 시간, 에너지, 연산 처리능력 등이며 효율적인 MFR 운용을 위해서는 최적화된 실시간 자원 관리 알고리즘과 제어용 통제 컴퓨터가 필요하다(Park et al., 2013).

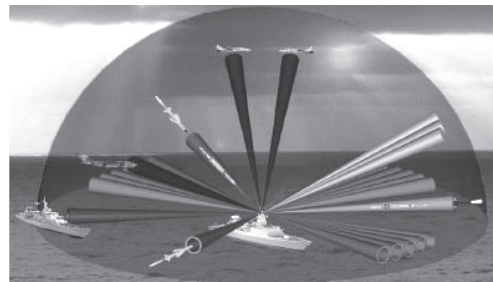


Fig. 1. A panels of MFR(Bridger & Ruiz, 2006)

해군에서 함정의 작전 수행 시에 적의 위협 징후 목록으로부터 각 위협세력의 발생 정도를 예측하고 이를 바탕으로 위협에 대응할 수 있도록 탐지체계인 MFR의 자원을 적절하게 할당하여 운영해야 한다. 위협에 대한 탐지가 이루어지면 위협에 대한 적절한 분석을 통하여 위

협을 회피하거나 직접 제거하는 등 적절한 방법으로 대응함으로써 합정은 주어진 임무를 안전하게 수행하고 기지로 복귀할 수 있다. 즉, 위협이 발생한 경우에는 위협에 대한 탐지가 곧 합정의 임무수행을 위한 중요한 요소이며 위협이 발생하지 않으면 합정의 임무수행에 특별한 장애는 없는 것으로 간주할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 합정에 대한 위협의 발생유무와 상관없이 안전하게 주어진 임무를 완수하고 귀환할 수 있는 합정생존율을 중요한 임무효과 측정단위로 제시하였다.

2.2 MFR 탐지확률

각 위협에 대하여 합정생존율을 향상하기 위한 효율적인 MFR 탐지체계 운영방안을 제시하고자 한다. 이를 위해 탐지확률과 MFR 자원할당 절차 수립에 필요한 여러 가지 변수는 Table 1과 같다.

$$P(x) = ax \dots\dots\dots (1)$$

$$P(x) = 1 - e^{-bx} \dots\dots\dots (2)$$

Table 1. Parameters of MFR resource allocation

Parameter	Content
P_a	대공위협 발생확률
P_b	대함위협 발생확률
P_c	대잠위협 발생확률
X_a	대공위협에 대한 MFR 자원할당 비율
X_b	대함위협에 대한 MFR 자원할당 비율
X_c	대잠위협에 대한 MFR 자원할당 비율
$P(x)$	MFR 자원할당량 x 에 따른 위협 탐지확률

식 (1)은 MFR 자원할당량이 증가함에 따라 위협에 대한 탐지확률이 선형으로 증가하는 경우를 나타내고 있으며, 식 (2)는 탐지확률이 MFR 자원할당량에 따라 지수형으로 증가하는 함수를 나타내고 있다. 이런 형태의 탐지확률 함수는 탐색에 투입한 자원의 양에 따라 선형과 지수형 함수로 근사화하는 것이 가능함이 알려져 있다 (Wagner et al., 1999). MFR의 경우 식 (1)과 같이 선형으로 증가하는 탐지확률 함수는 실제적이지는 않지만 다른 탐지확률 함수와 비교할 때 기준으로 사용할 수 있기 때문에 도입하였다. 지수형 탐지확률 함수인 식 (2)는 본 연구의 대상인 MFR의 실제적인 탐지확률 함수 형태와 유사한 것으로 추정되는 탐지확률 함수이다. Fig. 2는 본 연구에서 적용한 a값이 1인 선형 탐지확률 함수와 b값이

2, 4, 6인 경우의 지수형 탐지확률 함수 등 여러 가지의 탐지확률 함수를 보여주고 있다.

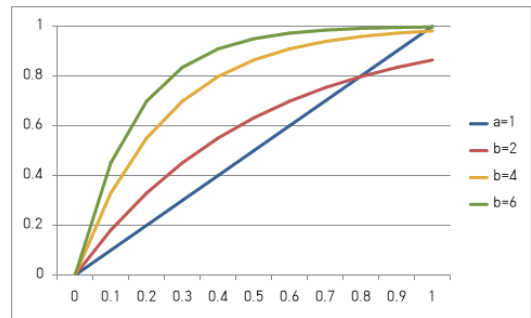


Fig. 2. The detection probability function of resource allocation of MFR

실제 합정이 안전하게 주어진 임무를 완수하기 위해서는 위협이 발생하지 않거나 발생한 위협에 대하여 탐지하고 적절하게 대응해야만 합정의 생존이 가능하다. 탐지된 위협에 대하여 항상 적절하게 대응할 수 있다는 가정 하에서 합정생존율(S)은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$S = (P_a \times P(X_a) + (1 - P_a)) \times (P_b \times P(X_b) + (1 - P_b)) \times (P_c \times P(X_c) + (1 - P_c)) \dots\dots\dots (3)$$

즉, 식(3)은 합정이 적의 한 위협에 대하여 생존하려면 위협이 발생한 경우에는 MFR 자원할당으로 인한 탐지확률만큼 생존할 수 있고 위협이 발생하지 않은 경우에는 100% 생존함을 나타낸다. 세 가지 위협에 대하여 탐지체계에서 모두 탐지한 경우에만 합정이 생존할 수 있는 것이다. 이는 신뢰도 공학 관점에서 볼 때 3개의 부품이 서로 직렬로 연결된 시스템과 같으며, 어느 하나의 부품이라도 고장이 발생할 경우 전체 시스템이 고장 나는 경우와 유사하다. 본 연구에서 다루는 MFR 자원할당 문제를 수리모형으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{Max } S \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{s.t. } X_a + X_b + X_c \leq 1 \dots\dots\dots (5)$$

$$0 \leq X_a, X_b, X_c \leq 1 \dots\dots\dots (6)$$

식 (4)는 MFR 자원할당 문제의 목적함수로 식 (3)에서 제시된 합정생존율을 최대로 하는 MFR 자원할당 방안을 찾는 문제임을 나타내고 있다. 식 (5)는 세 가지 위

협에 할당되는 MFR 자원할당 비율의 합은 1이내가 되어야 한다는 것이며, 식 (6)은 각 위협에 대한 MFR 자원할당 비율은 0과 1사이의 값이어야 함을 나타낸다.

2.3 Simulation 기법을 활용한 MFR 자원할당 방안

MFR 자원할당량에 대한 위협의 탐지확률이 식 (1)이나 식 (2)와 같이 주어졌을 때 다음과 같은 시뮬레이션 절차에 따라 모든 경우의 MFR 할당방안을 생성하여 식 (3)에서 제시한 함정생존율이 최대가 되는 MFR 자원할당량을 시뮬레이션을 통하여 구할 수 있다. Fig. 3은 위협별 MFR 자원할당량을 시뮬레이션 기법을 통하여 구하는 알고리즘을 나타내었다.

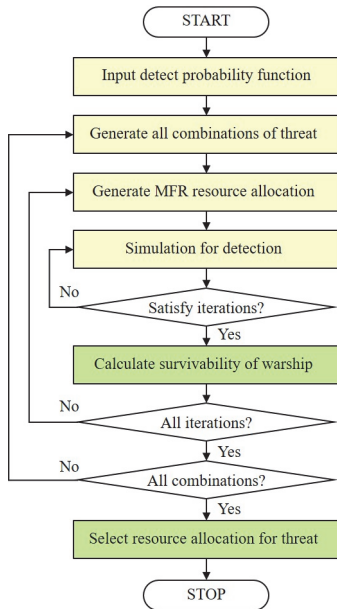


Fig. 3. Simulation algorithm for MFR resource allocation

시뮬레이션 알고리즘을 살펴보면 탐지확률 함수를 입력받고, 세 가지 위협에 대하여 위협이 발생할 모든 확률 조합을 구한다. 다음으로 각각의 위협확률로부터 실제 위협을 확률적으로 발생시키며, 이에 대한 각 위협별 MFR 할당 대안을 모두 생성한다. 위협에 대한 MFR 자원할당 대안에 대하여 최대반복 횟수만큼 탐지확률을 발생시켜 위협에 대한 함정생존율을 구하는 과정을 반복하는 것이다. 이러한 시뮬레이션 과정을 통하여 MFR 자원할당의 모든 대안에 대하여 반복실험을 시행하여 함정생존율이 가장 큰 MFR 자원할당 방안을 찾을 수 있다. 따라서 시뮬레이션 기법을 활용하면 모든 위협 발생 조합에 대해

여 최대의 함정생존율을 가지는 MFR 자원할당 방안을 구할 수 있게 된다.

반복적인 시뮬레이션 시행을 통한 함정생존율은 식 (7)과 같이 전체 시뮬레이션을 시도한 횟수를 기준으로 탐지에 실패한 횟수를 제외한 것으로 정의하였다. 전체 시뮬레이션을 시도한 총 횟수는 위협이 발생하지 않은 횟수, 위협이 발생한 상황에서 모든 위협을 탐지한 횟수, 위협이 발생한 상황에서 하나의 위협이라도 탐지하지 못한 횟수를 포함하고 있다. 따라서 식 (7)의 함정생존율은 위협이 발생하지 않은 경우를 포함하고 있다.

$$S = \frac{\text{총 시행횟수} - \text{탐지에 실패한 횟수}}{\text{총 시행횟수}} \times 100(\%) \dots (7)$$

2.4 Greedy 기법을 활용한 MFR 자원할당 방안

Greedy 기법은 최적해를 구하는 문제에서 근사적인 방법으로 해를 구하는 기법으로 의사결정이 필요한 시점마다 해당 단계에서 가능한 대안 중 가장 좋은 대안을 선택해서 해를 만들어가는 방법이다(Cormen et al., 1990). 하지만 바로 다음 단계의 상황만을 고려하여 의사결정을 수행하기 때문에 최적해를 보장하진 못한다는 단점이 있다. 그럼에도 불구하고 Greedy 기법은 해를 구하는 시간이 아주 짧으면서도 해의 결과가 상당히 우수한 직관적인 결과를 제공하는 것으로 알려져 있어 다양한 의사결정 문제에 적용이 이루어지고 있다.

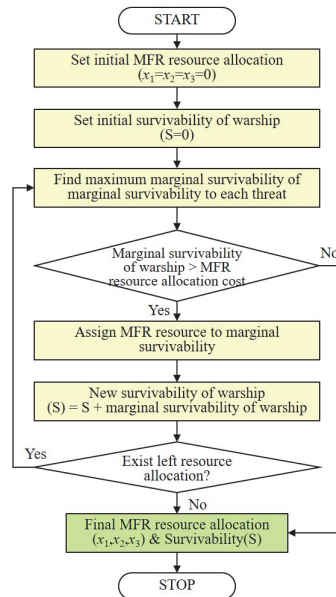


Fig. 4. Greedy algorithm for MFR resource allocation

본 연구에서는 MFR 자원할당량에 대한 탐지확률이 각 위협별 식 (1) 또는 식 (2)와 같이 주어졌을 때 합정의 생존확률이 가장 많이 증가하는 위협에 대하여 MFR 자원할당 비용보다 생존율 증가이득이 큰 경우 Fig. 4와 같은 Greedy 기법을 이용하여 MFR 자원할당량을 구할 수 있다. Fig. 4에서 먼저 대공, 대함, 대잠위협 초기 MFR 자원할당량을 각각 0%로 설정하고 초기 합정생존율 S의 값은 0으로 설정한다. 다음 단계에서 각 위협에 대하여 현재 MFR 자원할당량에 한 단위의 자원을 추가할 경우 식 (3)을 이용하여 증가된 합정생존율을 구한다. 가장 많이 증가된 합정생존율과 관련된 이익이 MFR 자원할당 비용보다 크면 해당 위협에 MFR 자원할당량을 한 단위만큼 증가시키고 합정생존율을 수정한다. 추가할 자원이 있으면 다시 반복하여 단위만큼 할당을 추가하고 더 이상 추가할 자원이 없거나 자원할당 비용이 이익보다 더 크면 자원할당을 종료한다.

3. MFR 자원할당 결과 분석

시뮬레이션 실험에서는 대공, 대함, 대잠위협 정도가 각각 0, 0, 0에서 최대인 1.0, 1.0, 1.0까지 1331가지 경우에 대하여 MFR 자원할당을 0%에서 최대 100%까지 1% 단위로 할당하는 모든 방안에 대하여 경우 당 10,000번 반복실험을 수행하였다. 선형 탐지확률 함수의 계수 a 값은 비교 기준으로 사용하기 때문에 세 위협 모두 1로 설정하였으며, 실제 MFR 탐지확률 함수와 유사한 형태인 지수형 탐지확률 함수 계수 b값은 위협 표적별 레이더면적(RCS: Radar Cross Section, 이하 RCS)의 크기를 고려하여 대공, 대함, 대잠위협별로 각각 4, 6, 2로 설정하였으며 이는 보안 등의 이유로 위협 표적별 RCS 실제 값을 적용하지 못하고 상대적인 크기만을 고려한 탐지확률 함수를 사용하였다. 또한, 실제로 MFR 자원할당 시에는 전력이나 장비부하 등 운영비용이 발생할 수 있으나, 본 연구에서는 자원할당 관련 비용은 없는 것으로 간주하여 MFR 자원을 100% 할당하는 방안에 대하여 실험을 수행하였다.

3.1 MFR 자원할당 결과 분석(선형 탐지확률 함수)

실험은 Windows10 운영체제에서 Intel(R) Core(TM) i3-4160 CPU, Ram 4GB 컴퓨터에서 Visual C++ 프로그램 이용하여 구현하였으며, 시뮬레이션 수행 시간은 1320초(22분)정도 소요되지만 Greedy 기법은 1초 이내의 짧은 시간이 소요되는 것으로 나타났다.

Table 2는 MFR 자원할당에 따른 세 가지 위협의 탐지확률 함수로 모두 식(1)을 적용한 경우 시뮬레이션을 이용한 경우 가장 높은 합정생존율을 보이는 자원할당과 Greedy 기법을 적용한 경우의 MFR 자원할당 결과의 일부를 나타내었다. 두 기법의 생존율의 차이는 Greedy 기법의 합정생존율과 시뮬레이션 기법의 합정생존율의 차이는 최대 4% 이내로 나타나 두 기법의 MFR 자원할당 결과가 상당히 유사함을 알 수 있다.

Table 2에서 Greedy 기법으로 MFR 자원할당을 수행한 경우 대공위협이 0.9 대함위협이 0.5 대잠위협이 0.1인 경우에는 대공위협에 94%, 대함위협에 6%, 대잠위협에 0%를 할당하는 것이 가장 좋으며 이때 합정생존율은 45.12%로 계산되었다. 같은 조건에서 시뮬레이션으로 구한 자원할당은 대공위협에 79%, 대함위협에 21%, 대잠위협에 0%를 할당하는 것이 가장 좋으며 이때 합정생존율은 43.91%로 나타나 Greedy 기법과 차이는 1% 정도 인 것으로 나타났다.

MFR 자원할당 결과를 보면 대공, 대함, 대잠의 세 가지 위협 중 발생 확률이 하나만 존재하는 경우에는 해당 위협에만 할당하는 것이 가장 높은 합정생존율을 보인다. 실제 운영상황과는 다를 수 있으나 주어진 조건에서 이론적으로는 너무나 당연한 할당 결과이다. 또한, 대공, 대함, 대잠위협 발생확률이 0.1, 0.1, 0.1이나 0.5, 0.5, 0.5 등과 같이 동일한 경우에는 각 위협별 MFR 자원할당을 각각 동일하게(34%, 33%, 33%) 할당하는 것이 항상 높은 합정생존율을 보이는 것으로 나타났다. 이는 실험에서 세 가지 위협에 대한 선형 탐지확률 함수를 모두 계수 a 값이 1인 동일한 함수를 사용하였기 때문인 것으로 생각된다.

시뮬레이션 기법과 Greedy기법의 MFR 자원할당 결과를 비교·분석해 보면 두 기법의 합정생존율은 최대 4% 이내로 나타나 두기법의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 시뮬레이션 수행 시간이 많이 소요되고 합정생존율의 차이가 작으므로 탐지확률 함수가 선형인 경우의 MFR 자원할당 결과 분석은 Greedy기법의 결과를 이용하여 분석하였다. Fig. 5-A부터 Fig. 5-E까지는 대함위협의 정도는 0.3으로 고정하고 대공위협의 수준이 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9인 경우에 대하여 각각 대잠위협이 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9인 경우의 Greedy 기법의 MFR 자원할당 결과를 나타내었다. Fig. 5에서 MFR 자원할당 결과는 대공위협과 대잠위협이 증가함에 따라 각각 위협별 자원할당량도 최대 100%까지 증가함을 알 수 있다. 이 결과는 대공위협과 대잠위협이 0.5이상으로 큰 경우에는 MFR 자

Table 2. A comparison of the result of MFR resource allocation for different type of threats in case of probability function(1)

Pa	Pb	Pc	Greedy Algorithm				Simulation				Gap (S _{greedy} - S _{simulation})
			Xa	Xb	Xc	S _{greedy}	Xa	Xb	Xc	S _{simulation}	
0.1	0.1	0.1	0.34	0.33	0.33	0.8130	0.37	0.32	0.31	0.8025	0.01
0.1	0.1	0.5	0.00	0.00	1.00	0.8100	0.00	0.00	1.00	0.7804	0.03
0.1	0.1	0.9	0.00	0.00	1.00	0.8100	0.00	0.00	1.00	0.7696	0.04
0.1	0.5	0.1	0.00	1.00	0.00	0.8100	0.00	1.00	0.00	0.7771	0.03
0.1	0.5	0.5	0.00	0.50	0.50	0.5063	0.00	0.62	0.38	0.5098	-0.00
0.1	0.5	0.9	0.00	0.06	0.94	0.4512	0.00	0.31	0.69	0.4433	0.01
0.1	0.9	0.1	0.00	1.00	0.00	0.8100	0.00	1.00	0.00	0.7677	0.04
0.1	0.9	0.5	0.00	0.94	0.06	0.4512	0.00	0.73	0.27	0.4421	0.01
0.1	0.9	0.9	0.00	0.50	0.50	0.2723	0.00	0.49	0.51	0.3085	-0.04
0.5	0.1	0.1	1.00	0.00	0.00	0.8100	0.98	0.01	0.01	0.7770	0.03
0.5	0.1	0.5	0.50	0.00	0.50	0.5063	0.43	0.00	0.57	0.5066	-0.00
0.5	0.1	0.9	0.06	0.00	0.94	0.4512	0.30	0.00	0.70	0.4446	0.01
0.5	0.5	0.1	0.50	0.50	0.00	0.5063	0.52	0.48	0.00	0.5077	-0.00
0.5	0.5	0.5	0.34	0.33	0.33	0.2963	0.45	0.25	0.30	0.3101	-0.01
0.5	0.5	0.9	0.04	0.04	0.92	0.2509	0.13	0.18	0.69	0.2451	0.01
0.5	0.9	0.1	0.06	0.94	0.00	0.4512	0.23	0.77	0.00	0.4458	0.01
0.5	0.9	0.5	0.04	0.92	0.04	0.2509	0.22	0.58	0.20	0.2467	0.00
0.5	0.9	0.9	0.00	0.50	0.50	0.1513	0.05	0.48	0.47	0.1641	-0.01
0.9	0.1	0.1	1.00	0.00	0.00	0.8100	1.00	0.00	0.00	0.7686	0.04
0.9	0.1	0.5	0.94	0.00	0.06	0.4512	0.72	0.00	0.28	0.4421	0.01
0.9	0.1	0.9	0.50	0.00	0.50	0.2723	0.49	0.00	0.51	0.3091	-0.04
0.9	0.5	0.1	0.94	0.06	0.00	0.4512	0.79	0.21	0.00	0.4391	0.01
0.9	0.5	0.5	0.92	0.04	0.04	0.2509	0.65	0.15	0.20	0.2465	0.00
0.9	0.5	0.9	0.50	0.00	0.50	0.1513	0.53	0.02	0.45	0.1630	-0.01
0.9	0.9	0.1	0.50	0.50	0.00	0.2723	0.44	0.56	0.00	0.3084	-0.04
0.9	0.9	0.5	0.50	0.50	0.00	0.1513	0.50	0.50	0.00	0.1662	-0.01
0.9	0.9	0.9	0.34	0.33	0.33	0.0640	0.38	0.30	0.32	0.0965	-0.03

원을 위협이 가장 큰 곳에 많이 할당하는 것이 모든 경우에 가장 좋은 것은 아니지만 대다수의 경우 높은 함정 생존율을 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 6-A부터 Fig. 6-E까지는 대공위협을 정도를 0.5로 고정하고 대함위협 수준이 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9인 경우에 대하여 각각 대잠위협이 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9인 경우의 MFR 자원할당 결과를 나타내었다. Fig. 5와 마찬가지로 가능한 위협의 정도가 큰 곳에 MFR 자원할당은 많이 하는 것이 함정생존율이 높은 것을 알 수 있다. 이는 선형의 탐지확률을 가정한 경우에는 MFR 자원할당은 대부분은 위협의 확률이 가장 높은 곳에 자원 대부분을 많이(70%~100%) 할당하는 것이 함정생존율이 높은 것으로 나타났다.

3.2 MFR 자원할당 결과 분석(지수형 탐지확률 함수)

Table 3은 지수형 탐지확률 함수를 적용한 경우의 Greedy기법과 시뮬레이션을 이용한 경우 가장 높은 함정 생존율을 보이는 MFR 자원할당 결과를 나타내었다. 선형 탐지확률 함수식 (1)을 적용한 경우와 마찬가지로 대공, 대함, 대잠의 세 가지 위협 중 발생 확률이 하나만 존재하는 경우에는 해당 위협에만 할당하는 것이 최적이다. 그러나 대공, 대함, 대잠위협 발생확률이 0.1, 0.1, 0.1 또는 0.5, 0.5, 0.5 등과 같이 동일한 경우에는 선형 탐지확률 함수식 (1)을 적용하는 경우 MFR 자원할당을 세 위협에 대하여 골고루 할당하지만 지수형 탐지확률 함수식 (2)의 경우에는 대잠, 대공, 대함 순으로 MFR 자원을 더 할당하는 것이 함정생존율을 높이는 것으로 나타났다. 이

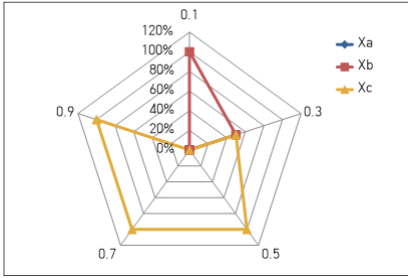


Fig. 5-A. The result of MFR resource allocation for different type of threats($P_a=0.1$, $P_b=0.3$)

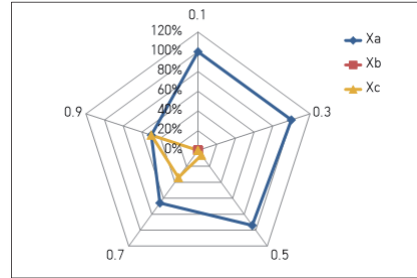


Fig. 5-E. The result of MFR resource allocation for different type of threats($P_a=0.9$, $P_b=0.3$)

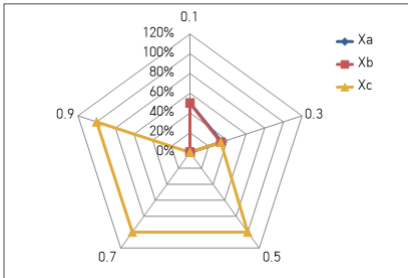


Fig. 5-B. The result of MFR resource allocation for different type of threats($P_a=0.3$, $P_b=0.3$)

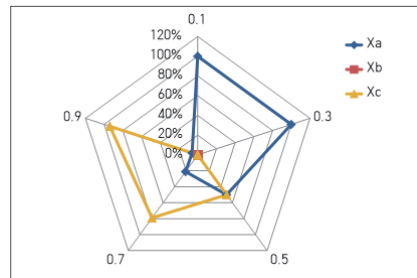


Fig. 6-A. The result of MFR resource allocation for different type of threats($P_a=0.5$, $P_b=0.1$)

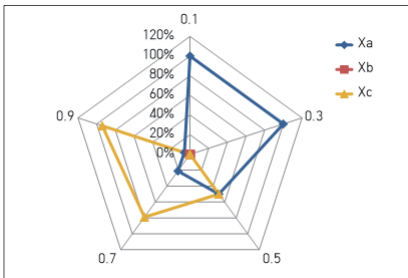


Fig. 5-C. The result of MFR resource allocation for different type of threats($P_a=0.5$, $P_b=0.3$)

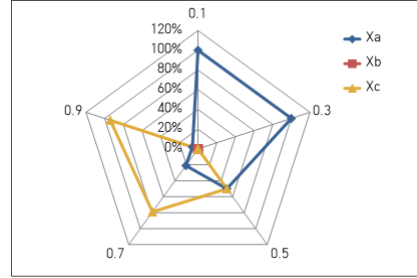


Fig. 6-B. The result of MFR resource allocation for different type of threats($P_a=0.5$, $P_b=0.3$)

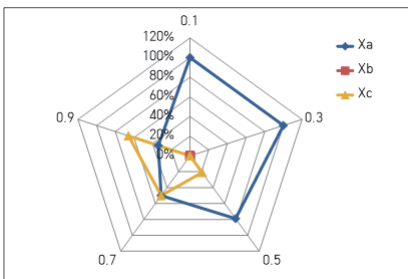


Fig. 5-D. The result of MFR resource allocation for different type of threats($P_a=0.7$, $P_b=0.3$)

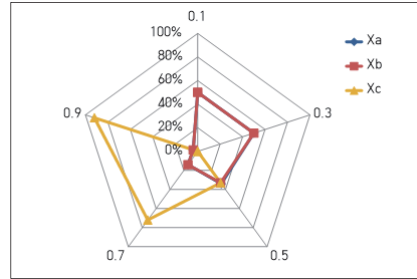


Fig. 6-C. The result of MFR resource allocation for different type of threats($P_a=0.5$, $P_b=0.5$)

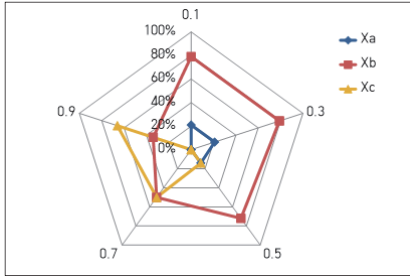


Fig. 6-D. The result of MFR resource allocation for different type of threats(Pa=0.5, Pb=0.7)

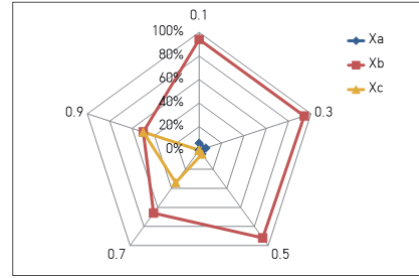


Fig. 6-E. The result of MFR resource allocation for different type of threats(Pa=0.5, Pb=0.9)

Table 3. The result of MFR resource allocation for different type of threats in case of probability function (2)

Pa	Pb	Pc	Greedy Algorithm				Simulation				Gap (S _{greedy} - S _{simulation})
			Xa	Xb	Xc	S _{greedy}	Xa	Xb	Xc	S _{simulation}	
0.1	0.1	0.1	0.35	0.30	0.35	0.9116	0.38	0.26	0.36	0.9077	0.00
0.1	0.1	0.5	0.12	0.15	0.73	0.7955	0.13	0.15	0.72	0.7950	0.00
0.1	0.1	0.9	0.04	0.09	0.87	0.7254	0.08	0.14	0.78	0.7327	-0.01
0.1	0.5	0.1	0.27	0.51	0.22	0.8826	0.23	0.52	0.25	0.8772	0.01
0.1	0.5	0.5	0.05	0.36	0.59	0.7323	0.08	0.36	0.56	0.7402	-0.01
0.1	0.5	0.9	0.00	0.29	0.71	0.6424	0.04	0.31	0.65	0.6557	-0.01
0.1	0.9	0.1	0.24	0.60	0.16	0.8700	0.22	0.52	0.26	0.8666	0.00
0.1	0.9	0.5	0.02	0.44	0.54	0.7051	0.07	0.40	0.53	0.7116	-0.01
0.1	0.9	0.9	0.00	0.36	0.64	0.6048	0.04	0.33	0.63	0.6174	-0.01
0.5	0.1	0.1	0.64	0.22	0.14	0.8650	0.62	0.26	0.12	0.8616	0.00
0.5	0.1	0.5	0.41	0.07	0.52	0.6946	0.42	0.08	0.50	0.7001	-0.01
0.5	0.1	0.9	0.33	0.01	0.66	0.5962	0.35	0.05	0.60	0.6142	-0.02
0.5	0.5	0.1	0.56	0.44	0.00	0.8217	0.46	0.40	0.14	0.8155	0.01
0.5	0.5	0.5	0.33	0.28	0.39	0.6056	0.31	0.25	0.44	0.6169	-0.01
0.5	0.5	0.9	0.25	0.22	0.53	0.4866	0.24	0.24	0.52	0.5171	-0.03
0.5	0.9	0.1	0.50	0.50	0.00	0.8015	0.48	0.46	0.06	0.7947	0.01
0.5	0.9	0.5	0.31	0.36	0.33	0.5684	0.32	0.34	0.34	0.5889	-0.02
0.5	0.9	0.9	0.22	0.30	0.48	0.4422	0.24	0.31	0.45	0.4786	-0.04
0.9	0.1	0.1	0.74	0.20	0.06	0.8427	0.66	0.21	0.13	0.8389	0.00
0.9	0.1	0.5	0.52	0.04	0.44	0.6482	0.51	0.08	0.41	0.6609	-0.01
0.9	0.1	0.9	0.42	0.00	0.58	0.5377	0.42	0.05	0.53	0.5581	-0.02
0.9	0.5	0.1	0.62	0.38	0.00	0.7896	0.60	0.36	0.04	0.7865	0.00
0.9	0.5	0.5	0.44	0.25	0.31	0.5490	0.45	0.25	0.30	0.5665	-0.02
0.9	0.5	0.9	0.35	0.19	0.46	0.4192	0.31	0.22	0.47	0.4541	-0.03
0.9	0.9	0.1	0.56	0.44	0.00	0.7614	0.56	0.43	0.01	0.7631	-0.00
0.9	0.9	0.5	0.41	0.33	0.26	0.5080	0.40	0.33	0.27	0.5329	-0.02
0.9	0.9	0.9	0.32	0.27	0.41	0.3720	0.37	0.25	0.38	0.4136	-0.04

는 지수형 탐지확률 함수에서는 표적별 상대적인 RCS를 고려하여 대잠, 대공, 대함 위협 순으로 탐지확률이 작도록 b값을 서로 다르게 설정하였기 때문인 것으로 생각된다. 두 기법의 함정생존율은 차이는 최대 4% 이내로 나타나 지수형 탐지확률 함수도 두 기법간 MFR 자원할당 결과는 매우 유사함을 알 수 있다.

Fig. 7-A부터 Fig. 7-E까지는 대함위협 정도는 0.3으로 고정하고 대공위협 수준이 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9인 경우에 대하여 각각 대잠위협이 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9인 경우의 Greedy 기법을 활용한 MFR 자원할당 결과를 나타내었다.

MFR 자원할당 결과는 대공위협과 대잠위협이 증가함에 따라 각 위협별 자원할당량도 최대 70%까지 증가함을 알 수 있다. 대함위협에 대한 자원할당은 20%에서 최대 40%까지 할당하는 것이 좋은 것으로 나타났다. 대잠위협이 0.5 보다 작은 경우에는 대공위협이나 대함위협에 자원을 할당하고 대잠 위협이 0.5이상일 경우에는 대공위협과 대잠위협에 MFR 자원을 할당하는 것이 함정 생존율을 높인 것으로 나타났다.

Fig. 8-A부터 Fig. 8-E까지는 대공위협 정도를 0.5로 고정하고 대함위협 수준이 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9인 경우에 대하여, 각각 대잠위협이 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9인 경우의 MFR 자원할당 결과를 나타내었다. Fig. 8에서 대공위협에 대하여 항상 22%에서 최대 64%까지 자원을 할당하는 것이 타당한 것으로 나타났다. MFR 자원할당은 대잠위협이 0.5보다 작은 경우 대공과 대함위협에 비슷한 정도의 자원을 할당하고 대잠위협이 0.5보다 큰 경우에는 대잠위협에 대하여 MFR 자원을 가장 많이 할당하고 위협의 발생 정도에 따라 차례대로 자원을 할당하는 것이 함정생존율을 높인 것으로 나타났다.

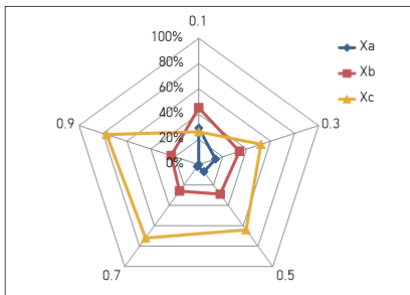


Fig. 7-A. The result of MFR resource allocation for different type of threats(Pa=0.1, Pb=0.3)

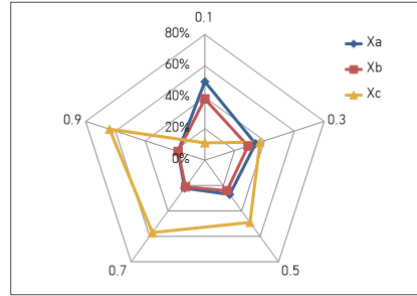


Fig. 7-B. The result of MFR resource allocation for different type of threats(Pa=0.3, Pb=0.3)

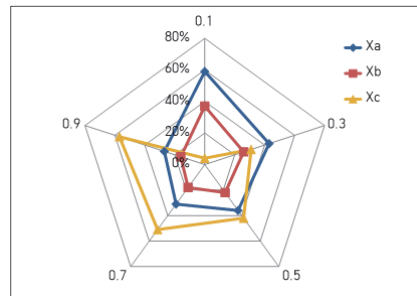


Fig. 7-C. The result of MFR resource allocation for different type of threats(Pa=0.5, Pb=0.3)

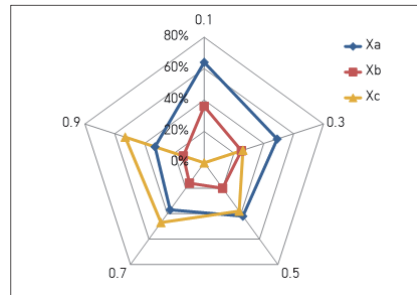


Fig. 7-D. The result of MFR resource allocation for different type of threats(Pa=0.7, Pb=0.3)

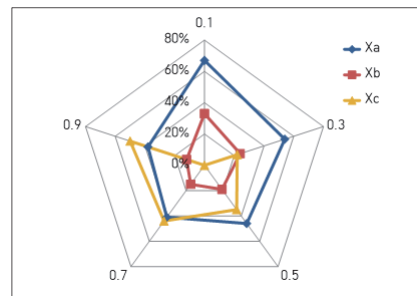


Fig. 7-E. The result of MFR resource allocation for different type of threats(Pa=0.9, Pb=0.3)

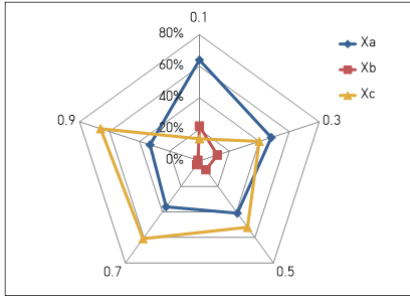


Fig. 8-A. The result of MFR resource allocation for different type of threats(Pa=0.5, Pb=0.1)

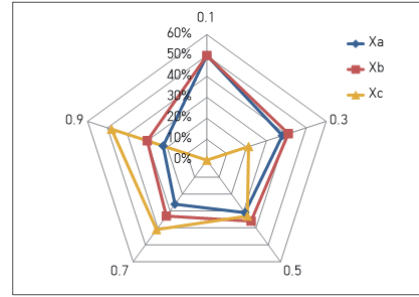


Fig. 8-E. The result of MFR resource allocation for different type of threats(Pa=0.5, Pb=0.9)

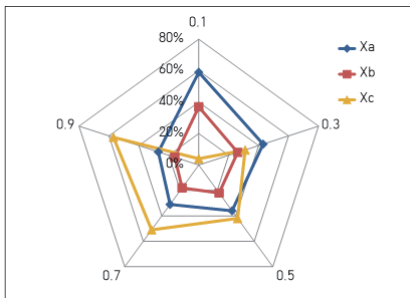


Fig. 8-B. The result of MFR resource allocation for different type of threats(Pa=0.5, Pb=0.3)

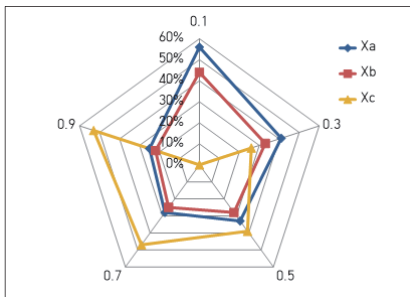


Fig. 8-C. The result of MFR resource allocation for different type of threats(Pa=0.5, Pb=0.5)

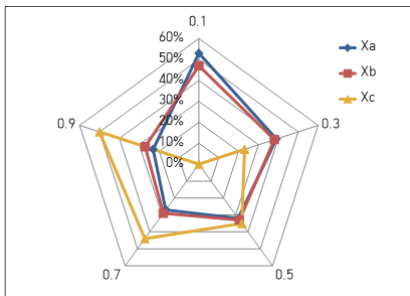


Fig. 8-D. The result of MFR resource allocation for different type of threats(Pa=0.5, Pb=0.7)

4. 결론

본 연구에서는 MFR 탐지체계를 가진 함정의 임무 수행 시 필요한 위협별 MFR 자원할당 문제를 다루었다. MFR 자원할당은 적의 징후로부터 각 위협의 정도를 예측한 경우 시뮬레이션을 이용한 기법과 Greedy 기법을 이용한 두 가지 MFR 자원할당 방안을 제시하여 그 결과를 비교·분석하였다. 자원할당량에 따른 두 종류의 탐지 확률 함수를 이용하여 시뮬레이션 기법의 결과와 Greedy 기법의 결과를 비교한 결과 함정생존율의 차이가 최대 4%로 나타나 서로 비슷한 자원할당 결과를 보여주고 있음을 알 수 있었다. 또한 Greedy 기법은 시뮬레이션 기법과 비교하면 그 수행 시간이 아주 짧아 실제 임무 수행 시에 이용 가능한 기법으로 판단되어 이를 바탕으로 결과분석을 수행하였다. 분석 결과 각 위협별 확률이 같은 경우에는 탐지확률 함수가 선형일 때에는 비슷한 비율로 각각의 위협별로 자원을 할당하고, 지수형 탐지확률 함수일 때에는 탐지확률 함수 값이 작은 대잠, 대공, 대함 위협 순으로 상대적으로 자원을 더 많이 할당하는 것이 함정생존율을 높이는 것으로 나타났다. 또한, 위협의 정도가 큰 경우, 보통, 작은 경우가 모두 존재할 때에는 탐지확률 함수가 선형일 때에는 대부분은 위협의 정도가 가장 큰 곳에 자원 대부분을 할당하고, 지수형일 때에는 위협의 정도 비율과 유사하게 자원을 할당하는 것이 함정생존율을 높이는 MFR 자원할당 방법으로 나타났다. 이러한 결과는 탐지확률 함수의 a값과 b값의 설정에 따른 영향 때문인 것으로 생각된다. 따라서 보다 신뢰할 수 있는 MFR 자원할당 방안을 결정하기 위해서는 RCS를 고려한 보다 정확한 b값의 설정이 중요함을 알 수 있었다.

본 연구에서 제시된 시뮬레이션 기법과 Greedy 기법은 비교적 빠른 시간 안에 해를 제시하고 있지만 최적해를 보장하지 못한다. RCS를 고려한 정확한 함정생존율

과 MFR 자원할당 비용을 고려하여 MFR 자원할당 문제의 최적해를 구할 수 있다면 제시된 휴리스틱 할당기법과 비교연구를 통하여 함정 작전시 MFR 운용에 많은 도움이 될 수 있는 결과를 도출할 수 있을 것으로 생각된다.

References

- Agency for Defense Development (2018), Ulsan Batch-III Multi Function Radar, www.jdep.plani.co.kr.
- Bridger, W. W., M. D. Ruiz (2006), Total ownership cost reduction case study: AEGIS radar phase shifters, Technical Report, Naval Postgraduate School.
- Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L. and Stein, C., (1990), Introduction to Algorithms, MIT Press.
- DAMIR, FY 2017 President's Budget (2016), Selected Acquisition Report : DDG 1000 Zumwalt Class Destroyer, Defense Acquisition Management Information Retrieval.
- Hanwhasystem, (2018) <https://www.hanwhasystems.com/front/pr/newsView.do> (Accessed Dec 30. 2018).
- Jeong, B.-M., D.-S. Jang, H.-L. Choi, J.-E. Roh, (2012), "Decision of track update-rate for efficient usage of resource on multi-functiton radar", In *Proceedings of the Korean Society for Aeronautical and Space Science*, 307-311.
- (정병민, 장대성, 최한림, 노지은 (2012) "다기능레이더의 효율적 자원 사용을 고려한 추적주기 선정", 한국항공우주학회 2012년 학술대회논문집, 307-311).
- Jeong, K.-W. (2014), 교전용 장거리 다기능 레이더 기술 동향 및 발전방향, 한국전자파학회지 전자파기술, 25(2), 21-29.
- Jeong, N.-H., S.-H. Lee, M.-S. Kang, C.-W. Gu, C.-H. Kim, K.-T. Kim (2018), Target Prioritization for Multi-Function Radar using Artificial Neural Network Based on Steepest Descent Method, *The Journal of Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 29(1), 68-76.
- (정남훈, 이성현, 강민석, 구창우, 김철호, 김경태 (2018) "최급 강하법 기반 인공 신경망을 이용한 다기능 레이더 표적 우선순위 할당에 관한 연구", 한국전자파학회논문지, 29(1), 68-76).
- Jeong, S.-J., D.-S. Jang, H.-L. Choi, J.-H. Yang (2014) "Task Scheduling and Multiple Operation Analysis of Multi-Function Radars", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Science*, 42(3), 254-262.
- (정순조, 장대성, 최한림, 양재훈 (2014) "다기능 레이더의 임무 스케줄링 및 복수 운용 개념 분석", 한국항공우주학회지, 42(3), 254-262).
- Ko, J.-Y., S.-S. Park, H.-L. Choi, J.-M. Ahn, S.-W. Lee, D.-H. Lee, J.-S. Yoon (2017), Implementation of Airborne Multi-Function Radar Including Attitude Maneuvering, *The Journal of Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 28(3), 225-236.
- (고재열, 박순서, 최한림, 안재명, 이성원, 이동희, 윤정숙 (2017) "자세 기동을 고려한 항공기 탑재 다기능 레이더 통합 시뮬레이터 구현", 한국전자파학회 논문지, 28(3), 225-236).
- Kim, H.-J., J.-Y. Park, D.-H. Kim, S.-J. Kim (2013) "A Study of Fuzzy Inference System Based Task Prioritization for the Improvement of Tracking Performance in Multi-Function Radar", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 24(2), 198-206.
- (김현주, 박준영, 김동환, 김선주 (2013) "다기능 레이더의 추적 성능 개선을 위한 퍼지 추론 시스템 기반 임무 우선 순위 선정 기법 연구", 한국전자파학회 논문지, 24(2), 198-206).
- Lee, J., Y.-J. Lim, Y.-S. Kim, H. Cho, Y.-M. Park, H.-C. Kim, K. Park, S.-M. Chung (2018), "A Study on MOE for Analyzing Effectiveness of a Surface Warship Detection System", In *Proceedings of the 2018 Fall Conference on the Korea Institute of Military Science and Technology*, 459-460.
- (이진호, 임요준, 김용삼, 조현진, 박영만, 김하철, 박경주, 정석문 (2018) "수상함 탐지체계 효과도 분석을 위한 MOE 설정에 관한 연구", 한국군사과학기술학회 2018년 추계학술대회논문집, 459-460).
- Lee, J.-H., S.-G. Lee, D.-S. Park, B.-L. Cho (2014) "Effective Beam Structure for Multi-Target Detection and Tracking in the Active Electrically Scanned Array Radar", *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, 25(10), 1069-1076.
- (이주현, 이석곤, 박대성, 조병래 (2014) "능동위상배

열 레이더에서 다중표적 탐지/추적을 위한 효과적인 빔 구조 연구”, 한국전자과학회논문지, 25(10), 1069-1076).

Naval Technology(2018), Holland Class Offshore Patrol Vessels, www.naval-technology.com.

Park, J.-W., D.-S. Jang, H.-L. Choi, M.-J. Tahk, J.-E. Roh, S.-J. Kim (2013) “Integrated Simulator of Airborne Multi-function Radar Resource Manager and Environment Model”, *Journal of The Korean*

Society for Aeronautical and Space Science, 41(7), 577-587.

(박정우, 장대성, 최한림, 탁민제, 노지은, 김선주 (2013) “항공기용 다기능 레이더 자원 관리자 및 환경 통합 시뮬레이터”, 한국항공우주학회지, 41(7), 577-587).

Wagner, D., H. Mylander, W. Charles (1999), *Naval Operations Analysis*, Naval Institute Press.



박 영 만 (ymanpark@navy.ac.kr)

1995 부산대학교 산업공학과 학사
1997 부산대학교 산업공학과 석사
2003 부산대학교 산업공학과 박사
2005~ 현재 해군사관학교 국방경영학과 교수

관심분야 : 시뮬레이션, 생산관리, 운영분석, 물류시스템



이 진 호 (jinho7956@gmail.com)

2002 해군사관학교 전기공학 학사
2006 연세대학교 산업공학 석사
2012 University of Texas at Austin 경영과학 박사
2012~ 현재 해군사관학교 국방경영학과 교수

관심분야 : 확률적 최적화, 시뮬레이션, 시스템 효과도 분석



조 현 진 (hijcho@webmail.korea.ac.kr)

2005 해군사관학교 정보통신공학과 학사
2009 Washington University in Saint Louis 전자시스템공학 석사
2016 고려대학교 전기전자전파공학과 박사
2016~ 현재 해군사관학교 전기전자공학과 조교수

관심분야 : 수중음향신호처리, 패턴인식, 무기체계 효과도 분석



박 경 주 (parkkj9@gmail.com)

1990 해군사관학교 해양학과 학사
1998 군사과학대학원 해양과학과 석사
2003 한양대학교 지구해양과학과 박사
2010~ 현재 해군사관학교 해양학과 교수

관심분야 : 수중음향



김 하 철 (hckim62@gmail.com)

1985 경북대학교 전자공학과 학사
1987 경북대학교 전자공학과 석사
1999 경북대학교 전자공학과 박사
1993~ 현재 해군사관학교 전기전자공학과 조교수

관심분야 : 전자파 수치해석, 안테나, 레이다공학



임 요 준 (navygeneral@kmou.ac.kr)

1998 광운대학교 전자공학과 학사
2010 국방대학교 군사전략학과 석사
2019 한국해양대학교 해양정책학과 박사수료
2017~ 현재 해군사관학교 군사학과 교수

관심분야 : 함정전투체계, 국제해사법과 전쟁법, 군사원조와 무기종속



김 해 근 (malza1030@gmail.com)

2008 해군사관학교 전기공학과 학사
2018 국방대학교 안보정책학과 석사
2018~ 현재 해군사관학교 작전학과 조교수

관심분야 : 함정전투체계



이 호 철 (hclee@add.re.kr)

1998 부산대학교 제어기체공학과 학사
2000 부산대학교 지능기체공학과 석사
2005 부산대학교 지능기체공학과 박사
2005~ 현재 국방과학연구소 함정전투체계개발단 책임연구원

관심분야 : 함정전투체계



정 석 문 (linosmchung@gmail.com)

1985 부산대학교 전자공학과 학사
1987 부산대학교 전자공학과 석사
1994 부산대학교 전자공학과 박사
1993~ 현재 해군사관학교 무기체계공학과 교수

관심분야 : 함정전투체계, 효과도 모델, 광통신시스템