



Received: 2023/01/18
Revised: 2023/01/31
Accepted: 2023/02/27
Published: 2023/03/31

***Corresponding Author:**

Sung-Jin Cho
E-mail: uuboot@naver.com

프랙탈 차원을 이용한 탐색패턴의 탐지효과도 평가방법 연구

A Study on the Detection Effect Evaluation Method of Search Pattern Using Fractal Dimension

조성진*

전(前) 해군중령/합동참모본부 분석실험실 해상수중전력분석석담당

Sung-Jin Cho*

Former CDR, ROK Navy/Manager of Maritime and Underwater Forces Analysis, Office of Analysis & Experimentation, ROK Joint Chiefs of Staff

Abstract

탐색문제는 제한된 탐색 능력으로 표적에 대한 탐지 가능성을 최대화하는 운용방법을 연구하는 것이다. 그 중 효과적인 탐색패턴을 찾는 것은 중요한 연구대상이나 다양한 패턴 형상의 효과를 정량적으로 평가하는 것은 현실적으로 M&S만이 가능하다. 형상의 특성을 정량화하는 방법 중 프랙탈 차원이라는 평가 방법이 있으며, 본 연구에서는 이 개념을 이용한 패턴 효과평가 방법을 제시하였다. 다양한 프랙탈 차원 평가 방법 중 BCD(box counting dimension) 방법을 이용하여 프랙탈 차원 값이 탐지율과 상관관계가 있음을 보였다.

The search problem is to study an operational method that maximizes the possibility of detecting a target in limited search capability. Among them, finding an effective search pattern is an important research subject, but only M&S can realistically evaluate the effect of various pattern shapes quantitatively. Among the methods for quantifying shape characteristics, there is an evaluation method called fractal dimension, and this study presented a pattern effect evaluation method using this concept. Among various fractal dimension evaluation methods, the BCD(box counting dimension) method was used to show that the detection rate correlated with the fractal dimension value during the same search time.

Keywords

탐색이론(Search Theory),
프랙탈 차원(Fractal Dimension),
모델링 & 시뮬레이션(M&S),
군사 운영분석(Military OR)

1. 서론

탐색문제의 목적은 제한된 탐색 능력으로 표적에 대한 탐지 가능성을 최대화하는 운용방법을 연구하는 것이다. 탐색문제에서 중요한 산출 값은 탐지효과도이다. 탐지는 플랫폼이 탐색이라는 행동을 통하여 표적을 접촉/식별하는 것을 뜻하며 효과 값은 확률/탐지율로 표현된다. 탐색문제의 군사분야 연구는 제2차 세계대전시 독일의 U-보트 공격에 대항하기 위한 연합군의 노력으로 시작되었다[1]. 특히 대잠 탐색 문제 특징은 Fig. 1과 같이 탐색자의 탐지거리가 짧으며 표적의 위치는 시간이 지날수록 불확실하다는 점이다. 이를 위한 연구로 현재까지도 활용되고 있는 Koopman 연구는 탐색문제 연구의 기원이 되고 있다[2]. 당시에는 실전 자료와 통계/확률로서만 연구되었고 이후 M&S를 이용함으로써 다양한 시나리오 연구가 가능하게 되었다.

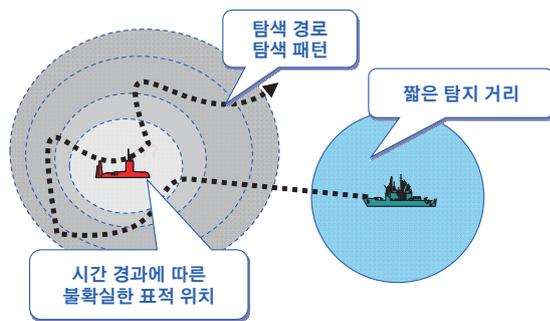


Fig. 1. 탐색문제의 특징

탐지에 영향을 주는 요소들은 센서 성능, 운용 환경, 플랫폼 기동 등 다양하며 특히 탐색 플랫폼의 탐색패턴은 중요한 연구 주제이다. 탐색문제 연구결과는 의사결정지원체계 탐색부분에 탑재하거나 M&S의 모의논리 분야에 적용하는 등의 활용이 가능하다. 무인무기체계의 전투효과분석[3]에 추가하여 유·무인체계의 효과적인 탐색운용을 지원하는 의사결정지원의 알고리즘 논리로 응용하는 것도 가능할 것이다.

본 연구에서 탐색문제 환경은 할당된 탐색구역 내에서 표적의 정확한 위치 정보를 모르는 상황이며, 여기서 효과적인 탐색패턴에 대한 평가방법을 제시하고자 한다. 탐지의 효과도 값은 탐지이론의 탐지확률식에 의한 방법과 시뮬레이션을 이용하여 구하는 방법이 있다. 탐지확률식에 의한 방법은 탐색패턴과 상관없이 탐색면적만으로 값을 구하기 때문에 탐색패턴에 대한 효과를 평가하기 어렵다. 시뮬레이션에 의한 방법은 다양한 탐색패턴에 대해 반복 실험이 가능하므로 쉽게 효과를 평가할 수 있다. 그러나 실제로 가장 좋은 평가 방법은 실기동 실험이지만 시간과 비용 면에서 큰 제약이 있으므로 시뮬레이션을 이용하면 패턴의 수를 좁혀가는 효율적 연구를 할 수 있다.

본 연구에서는 탐색 패턴의 효과도 평가를 위하여 프랙탈의 차원 개념을 응용하였다. 기존 탐지확률식은 탐색밀도만을 고려함으로써 탐색패턴의 효과도를 평가하는데 한계가 있지만 프랙탈 차원은 탐색패턴의 형상 특성을 차원 값으로 표현할 수 있기 때문이다[4]. 프랙탈 차원 중 2차원 형상의 패턴은 0과 2 사이의 수치로 나타낼 수 있는데 0에 가까우면 패턴이 한 곳에 집중되었다는 것을, 2에 가까우면 2차원 평면에 넓게 퍼져있다는 의미가 된다. 프랙탈 차원을 구하는 방법으로는 BCD(box counting dimension)를 사용하였으며 시뮬레이션에서 구한 탐지율과의 상관관계 비교를 통하여 프랙탈 BCD 평가가 유용함을 보였다.

2. 탐색문제 관련 연구

2.1 탐색문제 구분 및 연구 대상

탐색문제를 모형화하기 위해서는 탐색자(searcher), 표적(target), 탐색환경 등 각 요소의 특성을 고려하여 탐색문제를 모형화해야 한다. 탐색문제가 구하고자 하는 목적에 따라서 다양한 형태의 탐색문제가 연구되어

왔는데, 이를 종합적으로 연구 및 정리한 문헌으로는 Benkoski et al.[5], Chudnovsky & Chudnovsky[6] 등이 있다.

주요 탐색문제의 요소 형태는 Table 1과 같이 다양하게 구분할 수 있으며 연구목적에 따라 다양한 연구접근이 가능하다.

Table 1. 탐색문제의 요소 형태와 속성

요소 형태	속성
최초 표적 위치	알고 있음 vs. 모름
표적 이동 상태	고정표적 vs. 이동표적
탐색자 규모	단독탐색 vs. 다수탐색
탐색 방법	구역 할당 vs. 구역간 이동
효과도 평가	탐지확률 최대화 vs. 탐지시간 최소화

본 연구는 최초 위치를 모르는 이동표적에 대해 단독 구역할당 탐색시 탐지확률을 최대화하는 탐색패턴 효과 평가방법에 대한 연구이다.

2.2 탐색이론을 이용한 탐지확률 산출

탐색활동을 통한 탐지확률을 구하는 일반적인 탐지확률식은 Koopman[2]의 연구 중 식(1)과 같다.

$$\text{탐지확률: } Pd = 1 - e^{-wvt/A} \quad (1)$$

식 (1)에서 w 는 탐색폭, v 는 탐색속도, t 는 탐색시간이며 A 는 탐색해야 할 전체 탐색구역의 면적을 나타낸다. 탐지확률식은 탐색구역 내에 표적이 계속 존재하는 것으로 가정하며 탐색시간 t 가 클수록 탐지확률은 1에 근접한다. 탐지확률식은 간편하지만 회피기동하는 표적과 탐색패턴에 따른 효과 평가에는 제한된다. 탐지확률식은 탐색패턴이 다르더라도 동일한 면적을 탐색한다면 같은 탐지확률을 갖기 때문이다.

2.3 시뮬레이션을 이용한 탐지율 산출

탐지확률식에서 기본적인 가정은 탐색구역 내에 표적이 존재하고 있다는 것이다. 침몰선, 기뢰탐지 등과 같은 상황에서는 이 가정이 적절하지만 잠수함과 같은 경우에는 표적이 탐색구역 내에 계속 있다는 보장이 없으

며 또한 원거리에서 회피기동까지 한다. 즉 탐지확률식은 이와 같은 상황에서 적용이 제한되며, 또한 탐색패턴에 대한 차이를 구별할 수 없다. 이러한 이유로 보다 현실적인 탐지확률을 구하기 위해서는 시뮬레이션을 이용하는 방법이 유용하다. 시뮬레이션은 실기동 실험이 곤란한 경우 가상환경에서 모의로 현실을 구현한다는 의미를 가지고 있다.

효과적인 탐색패턴을 구하기 위해 실기동 실험을 한다는 것은 실제 플랫폼들을 동원해 Fig. 2와 같은 다양한 패턴 대안들을 실험하는 것이다. 이는 시간과 비용 등의 문제를 야기하므로 컴퓨터를 활용한 시뮬레이션이 패턴 대안의 수를 좁혀가는 효과적인 방법일 수 있다. 시뮬레이션에서 탐지율은 반복 실험한 총 실험 횟수에 대해 탐지한 횟수의 비율로 정의한다.

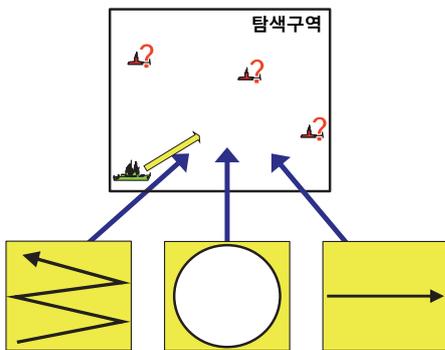


Fig. 2. 다양한 탐색패턴 대안들

개체 기반 시뮬레이션(agent based simulation)을 이용한 탐색문제 연구도 흥미롭다. 개체 기반 시뮬레이션은 개체(agent)에게 성향이라는 요소를 반영하여 시뮬레이션 분석을 하는 것이다. 주어진 규칙을 바탕으로 매 상황마다 어떠한 성향이 목적인 임무에 적절한지를 연구한다. 이와 관련 연구로는 세계 제2차 세계대전 전쟁사 자료를 바탕으로 연합군에 의한 독일 U-보트 대잠수함 작전 연구[7,8,9]들이 있으며 결과를 역사적 실제 자료와 비교분석하였다. 개체 기반 시뮬레이션은 다양한 분야에서 연구 중이며 활용 가치가 높은 방법이다.

3. 프랙탈 차원을 이용한 평가

3.1 프랙탈 차원

프랙탈 차원이란 자기유사성(self-similar), 닳은꼴을 의미하며 형상을 확대/축소하면서 그 형상의 유사성(닳은꼴)을 차원이라는 값으로 표현한 것이다. Fig. 3의 형상을 코흐 도형이라 하는데 프랙탈 차원으로 1.26 값을 가진다[4].

은꼴)을 차원이라는 값으로 표현한 것이다. Fig. 3의 형상을 코흐 도형이라 하는데 프랙탈 차원으로 1.26 값을 가진다[4].

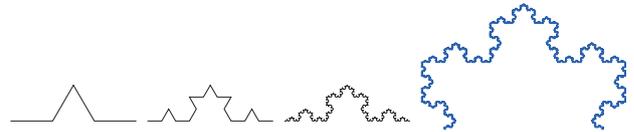


Fig. 3. 프랙탈 차원 값의 예 (코흐 도형 1.26 차원)

프랙탈 차원 값 계산방법은 다양하며 본 연구에서는 계산방법 중 하나인 격자로 나누어 계산하는 BCD(box counting dimension)[4]를 이용하였다. BCD를 이용하여 프랙탈의 차원을 구하는 방법은 다음과 같다. 먼저 패턴을 일정 크기의 격자(box)로 세분화하고 격자에 포함된 선(또는 점)의 개수를 얻는다. 격자 스케일과 각 스케일 별로 선(또는 점)이 포함된 격자 개수를 log화하여 회귀분석한 직선의 기울기가 프랙탈 차원이 된다. 프랙탈 차원의 의미는 대상을 계속 세분화할 때 유사성 형태를 유지하기 위한 격자 개수의 비율이다.

$$\log N = D \log\left(\frac{1}{d}\right) + c \tag{2}$$

BCD에서 차원은 식 (2)와 같이 정의된다. d 는 격자의 스케일이며 N 은 각 스케일에서 카운팅된 격자(box) 개수, 기울기 D 는 BCD 차원, c 는 상수이다. 여기서 구하여지는 차원 D 는 0과 2 사이이다. Fig. 4의 예에서 세계지도는 BCD 방법으로 1.6374 값이 산출되었다[10].

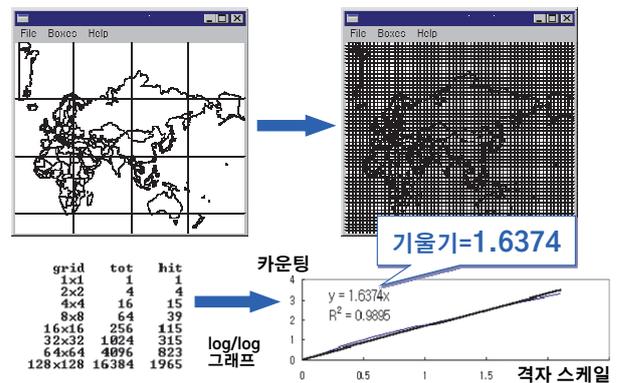


Fig. 4. BCD를 이용한 차원 계산 예 (세계지도 1.6374 차원)

3.2 탐색패턴에 대한 프랙탈 차원 의미

차원 D 값의 의미는 2차원 평면으로 생각하면 된다.

즉 $D = 2$ 이면 패턴이 전체 면적과 동일하다는 의미가 되며, D 가 작아질수록 고르게 분포하지 않는다는 의미를 가진다. 탐색자가 동일한 면적을 탐색하더라도 탐색패턴 형태에 따라 프랙탈 차원은 같지 않다.

Fig. 5는 같은 탐색밀도를 가진 다른 패턴의 예를 보이고 있다. 탐색밀도는 31 %로 같지만 좌측 차원은 1.585이고, 우측차원은 1.793으로서 우측이 차원 2에 더 가깝다. 그림에서도 알 수 있듯이 우측의 패턴이 더 확대된 형태를 가지고 있어서 주어진 면적 내에서 더 넓게 퍼져 있는 모양이다. 이러한 패턴은 표적이 이동하거나 회피하는 경우 최초 정보를 받은 후 빠른 시간 내 주어진 구역을 훑어야 하는 경우 효과적이다. 반면 기뢰탐색과 같이 고정된 표적에 대해서는 시간제한이 덜하므로 꼼꼼히 탐색하는 것이 효과적이다. 같은 차원을 가지더라도 탐색패턴은 다양할 수 있으며 이는 표적이 탐색자 경로를 예측하여 회피시 혼란스럽게 할 수 있다.

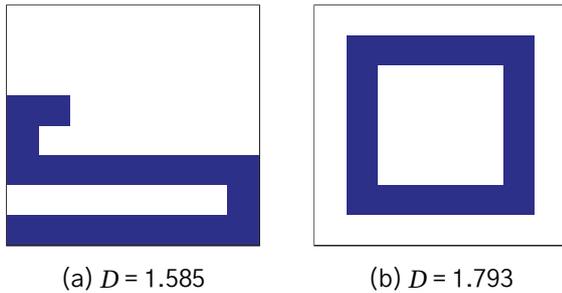


Fig. 5. 동일 밀도에서 패턴에 따른 프랙탈 BCD 차원

패턴과 관련 프랙탈 차원을 이용한 군사관련 연구들을 소개하면, Lauren[11]은 이러한 개념을 화력집중도를 평가하는 방법으로 사용하였으며, 조성진 등[10]은 지형의 밀집도가 전투에 미치는 영향을 전쟁사 사례와 비교하여 연구하였다.

4. 실험모델 구성과 프랙탈 평가 결과

4.1 실험모델 구성

시뮬레이션을 위한 실험모델의 구성요소로 탐색자의 이동형태(탐색패턴), 탐색속도, 탐지거리, 탐색구역의 크기, 탐색시간 등으로 구분하였다. 탐색자의 이동은 탐색패턴의 경로를 따라 이동하는 형태이며, 표적은 탐색자를 탐지하였을 때 회피기동을 한다. Table 2는 탐색패턴 실험을 위한 구성요소들을 나타낸 것이다.

Table 2. 탐색패턴 실험을 위한 구성

구분	탐색자	표적
이동 형태	탐색패턴 경로를 따라 이동 (5가지 탐색패턴)	탐색함을 탐지시 회피기동
이동 속도	15 KTS	5 KTS
탐지거리	2 NM, 3 NM (2종류)	4 NM
기타	탐색구역 크기: 30 NM × 30 NM 탐색시간: 10시간	

표적의 이동형태는 현실성을 반영하여 탐색자를 먼저 탐지하여 회피기동하는 것으로 설정하였다. 그러나 표적의 속도는 탐색자보다 느리게 설정하여 회피한다 하더라도 탐색자에게 탐지될 가능성은 여전히 있다. 시뮬레이션이 시작되면 탐색자는 탐색패턴의 시작점에 위치하며 표적은 임의의 위치에서 임의의 방향으로 이동하고 탐색자 접촉시 탐색자로부터 멀어지는 방향으로 경로를 변경한다. 시뮬레이션 종료 조건은 탐색자가 표적을 탐지했을 때, 탐색시간 10시간에 도달했을 때, 표적이 탐색구역 밖으로 벗어났을 때이다.

본 실험에서는 Table 3와 같이 5가지의 탐색패턴을 사용하였으며 탐지거리 2 NM과 3 NM에 대한 프랙탈 BCD 차원 값은 1.79 - 1.99로 계산되었다(사용 소프트웨어: Fractal Dimension Estimator).

Table 3. 탐색자의 탐지거리에 따른 BCD 차원

탐지거리	패턴				
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
2 NM	1.79	1.81	1.81	1.83	1.9
3 NM	1.86	1.9	1.9	1.93	1.99

4.2 패턴별 시뮬레이션 실험 결과

시뮬레이션 실험은 탐색자의 5가지 탐색패턴과 2가지 탐지거리를 조합한 10가지 경우에 대하여 각 1,000회 실행하여 결과를 구하였다.

Fig. 6는 2번 패턴에서 탐색자 탐지거리 2 NM에 대한 시뮬레이션 실행화면을 나타낸 것이다. Table 4는 실험 결과이며 탐지율은 0.08 - 0.24 범위로 산출되었다.

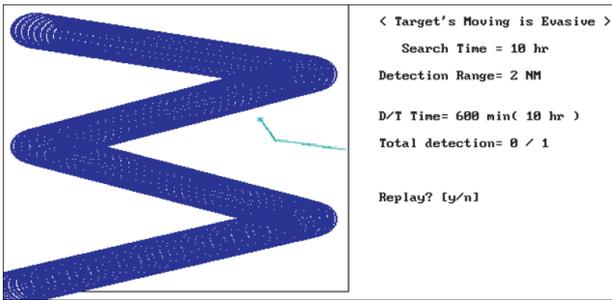


Fig. 6. 탐색패턴 2번에 대한 시뮬레이션 화면

Table 4. 탐색자의 탐지거리에 따른 탐지율

탐지거리	패턴				
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
2 NM	0.08	0.1	0.11	0.13	0.15
3 NM	0.16	0.19	0.21	0.23	0.24

탐색자의 탐지거리가 3 NM인 경우에도 탐지율은 최대 20 %대에 머물고 있다. 이는 탐지거리 내에서 표적을 100 % 탐지한다는 가정 하에서 산출된 시뮬레이션 결과임을 생각할 때 표적이 탐색자를 인지·회피하는 경우 탐지하기가 매우 어려움을 알 수 있다. 실험 결과는 5번 패턴이 탐지율 24 %로 탐지효과가 가장 높은 패턴으로 나타났다.

참고로 Koopman의 탐지확률식으로 계산한 10시간 탐색시 탐지확률은 탐지거리 2 NM에서 48.6 %, 3 NM에서 63.2 %이다. 이는 표적이 탐색구역 내에 계속 있다는 가정하에 산출된 것이다. 따라서 Koopman의 식은 고정표적에 대한 연구에 적용함이 적절하며 회피 등 이동 표적에 대한 연구는 시뮬레이션 방법이 적절하다. 또한 패턴별 시뮬레이션 실험결과에서 알 수 있듯이 탐색한 면적의 크기뿐 아니라 탐색패턴도 크게 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다.

4.3 탐지율과 BCD 간의 상관관계

5가지 탐색패턴과 2가지 탐지거리(2 NM, 3 NM)를 조합한 10가지 경우에 대한 각각의 탐지율과 BCD 간의 상관관계를 회귀분석을 통해 구하였다. Fig. 7은 그 결과를 그래프로 나타낸 것이며, R^2 를 상관관계의 척도로 정하였다.

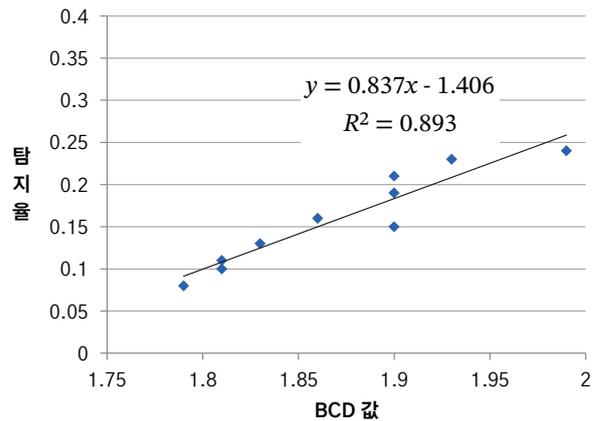


Fig. 7. 탐색패턴 별 탐지율과 BCD 차원의 상관관계

탐색패턴 시나리오 10개의 탐지율과 프랙탈 BCD 차원 간 상관관계는 $R^2 = 0.893$ 으로 아주 높은 상관성을 나타냈다. 이는 이동 및 회피기능하는 표적에 대한 탐색자의 탐색패턴 효과도를 평가할 때 프랙탈 개념이 유용함을 보인 것이다.

5. 결론

탐색문제에서 표적 정보가 없는 경우의 효과적인 탐색패턴을 찾는 것은 매우 흥미로운 연구과제이다. 기존의 탐지확률식에 의한 탐지확률은 단순히 탐색밀도만 고려한 것이며 탐색패턴 영향이 반영되어 있지 않다. 또한 탐색구역 내에 표적이 계속 존재한다는 가정을 가지고 있어서 탐색시간이 많을수록 탐지확률이 높게 산출된다. 이에 비해 시뮬레이션을 이용한 탐지율 산출은 이동표적 등 다양한 상황과 조건을 반영한 모의 논리를 구현함으로써 보다 실제적인 값을 구할 수 있다.

본 연구에서도 시뮬레이션의 탐지율은 공식에 의한 탐지확률보다 낮은 결과를 보였다. 시뮬레이션을 이용하면 탐색패턴 별로 탐지율은 구할 수 있으나 추상적인 탐색패턴의 특성을 정량적으로 나타내지는 못한다. 같은 패턴이라도 시나리오에 따라 다른 산출 결과가 나올 수 있기 때문이다.

패턴 자체만 정량적으로 평가할 수 있는 방법으로 본 연구에서는 프랙탈 개념을 응용하여 탐색패턴 특성을 프랙탈 차원으로 표현하였다. 프랙탈 차원을 구하는 방법으로는 프랙탈 BCD를 사용하였으며 모두 10가지 실험 시나리오에 대하여 실험하였다. 실험 결과 탐색패턴의 프랙탈 BCD와 탐지율과의 상관관계는 $R^2 = 0.893$ 의 값을 보임으로써 프랙탈 BCD를 이용한 효과도 평가

방법이 유용함을 보였다. 전술한 내용을 요약하면 아래와 같다.

- 탐색패턴의 효과도 평가에서 탐지확률식은 탐색패턴을 고려하지 않고 탐색한 면적만으로 계산한다.
- 탐색패턴의 효과도 평가에서 프랙탈 차원은 패턴의 형상적 특징을 정량적 수치로 나타낼 수 있으며 시뮬레이션 실험결과 유용한 것으로 나타났다.

더불어, 본 연구를 발전시키기 위해 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다.

- 이상치(異常値) 결과를 보인 탐색패턴에 대한 연구가 필요하다. 패턴 5번의 탐지거리 2 NM은 프랙탈 BCD가 큰 값을 보였지만 탐지율은 이와 비례하여 높지 않았다.
- 제한된 탐색시간에 따른 효과적인 탐색패턴을 만들어주는 알고리즘 연구가 필요하다. 정형화된 탐색패턴보다는 임의의 탐색패턴이 표적의 회피 능력을 감소시켜 탐지율을 높일 수 있을 것이다. 이 알고리즘을 탐색 의사결정지원체계에 탑재하면 매우 활용성이 높을 것이다.

본 연구의 의의는 프랙탈 차원이라는 순수과학 개념을 현실 문제에 응용하여 탐색패턴의 형상적 특성을 정량화하였다는 점에 있다.

참고문헌

- [1] C. H. Waddington, O.R. in World War 2: Operational Research against the U-boat, Paul Elek(Scientific Books)Ltd., London, England, 1973.
- [2] B. O. Koopman, Search and Screening : General Principles with Historical Applications, Military Operations Research Society, Alexandria, Virginia, USA, 1999.
- [3] 박선준, 민승식, 하용훈, “무인수상정의 전투효과도 분석,” 한국해군과학기술학회지, Vol. 5, No. 2, pp. 134-142, 2022.
- [4] Peitgen, Jurgens, Saupe, Chaos and Fractals, Springer, 2004.
- [5] S. J. Benkoski, M. G. Monticino, and J. R. Weisinger, “A survey of the search theory literature,” Naval Research Logistics, Vol. 38, pp. 469-494, 1991.
- [6] D. V. Chudnovsky and G. V. Chudnovsky, Search Theory: Some Recent Developments, Marcel Dekker, Inc., New York, USA, 1989.
- [7] L. E. Champagne, “Bay of Biscay: Extention into modern military issues,” Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, pp. 1004-1012, 2003.
- [8] L. E. Champagne and R. Hill, “Simulation validation with historic outcomes,” Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, pp. 1138-1147, 2005.
- [9] R. G. Carl and R. Hill, “Search theory, agent-based simulation, and U-boats in the Bay of Biscay,” Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, pp. 991-998, 2003.
- [10] 조성진, 이상현, “프랙탈 차원과 에이전트 기반 시뮬레이션을 이용한 지형이 전투효과에 미치는 영향 연구,” 한국시뮬레이션학회지, 제18권, 제4호, pp. 21-28, 2009.
- [11] M. K. Lauren, “Firepower concentration in cellular automaton combat models—an alternative to Lanchester,” Journal of the Operational Research Society, Vol. 53, No. 6, pp. 672-679, 2002.