

잠수함 생존율 극대화를 위한 최적 이동경로 계획 (An Optimal Path Planning for Survival Rate Maximization of Submarine)

† 김 기 태(Ki Tae Kim)*, 박 세 훈(Sehoon Park)**
 조 성 진(Sung Jin Cho)***, 전 건 욱(Geonwook Jeon)****

ABSTRACT

잠수함은 수중에서 임무를 수행하며, 은밀성을 강점으로 하는 매우 위협적인 무기체계이다. 하지만 잠수함은 센서에 의해 탐지되거나 수면 위로 부상하여 노출될 경우 적으로부터 공격을 받을 수 있는 위협에 직면하게 된다. 본 연구는 적 수상함정의 탐색활동과 잠수함의 잠항능력을 고려하여 생존율을 극대화하는 최적의 이동경로를 계획하였다. 잠수함의 생존율을 극대화하기 위한 이동경로 계획 수리모형을 구축하고, ILOG CPLEX를 이용하여 수리모형을 검증하였다. 잠수함의 생존율을 보장하고, 목표지점으로 이동하기 위한 휴리스틱 알고리즘을 이용하여 이동경로, 이동 단위시간(거리), 생존율, 계산시간을 도출하였다.

ABSTRACT

The submarine is very threatening and secretive weapon system that achieves missions under the sea. However, the submarine is faced with danger that can be attacked from the enemy when is detected by sensor or rose to the surface. This study will be planned optimal path to maximize the survival rate that considers submarine navigation capability in underwater and search activity of hostile warships. A mathematical programming model and a heuristic algorithm will be suggested in this study. The mathematical programming model is verified by using ILOG CPLEX. The submarine path, unit time(distance) of navigation, survival rate, and computation time is computed by using a heuristic algorithm.

Keywords : Path Planning, Submarine, Survival Rate, Heuristic

논문접수일 : 2010년 11월 4일 심사(수정)일 : 2010년 11월 19일 논문게재확정일 : 2010년 11월 29일

* 국방대학교 운영분석학과 박사과정

** 국방대학교 국방관리학과 박사과정

*** 국방대학교 운영분석학과 순환직 교수

**** 국방대학교 운영분석학과 교수

† 교신저자

1. 서론

잠수함은 수중을 잠항할 수 있는 군함을 말하며, 바다 속을 운항하여 목표지점이나 표적에 접근한 후 공격을 가한다. 초기에 잠수함은 주로 항만의 방어나 국지용으로 사용되었으나 디젤기관 발달과 원자력 추진체계가 잠수함에 도입됨으로써 잠항능력 및 항속력이 급격히 향상되었으며, 어뢰, 미사일 및 탐지장비의 성능 향상으로 오늘날에는 가장 위협적인 무기체계로 발전하였다.

잠수함의 가장 큰 이점은 보이지 않고 들리지 않는 은밀성을 들 수 있으며, 센서에 의해 탐지되거나 수면 위로 부상하여 노출될 경우 잠수함은 적으로부터 공격을 받을 수 있는 위험에 처하게 된다. 따라서 잠수함이 임무를 수행하기 위하여 목표지점이나 표적에 접근함에 있어 잠수함의 성능과 적의 탐색활동을 고려하고, 생존율을 극대화하는 최적의 이동경로 계획이 요구된다.

생존율을 극대화하는 이동경로 계획에 관한 연구는 다양하게 이루어지고 있다. Shupenus & Barr[15]는 지상에서 이동발사차량을 이용하여 미사일을 발사한 후 위치가 노출된 이동발사차량이 적의 공격을 피하여 다른 위치로 회피하는 문제를 제시하였다. Washburn & Hohzaki[17]는 디젤 잠수함이 어뢰를 이용하여 수상함을 공격한 후 수상함이나 대잠항공기의 탐색 및 공격으로부터 회피하는 Flaming Datum Problem(FDP)을 제시하였고, 잠수함과 수상함의 2인 영합 게임(Two person zero sum game)을 이용하여 배터리의 충전 및 소모량을 고려한 회피속력과 시간을 산출하였으며, Danskin[7], Chuan[6], Baston & Bostok[3], Thomas & Washburn[16]은 게임이론을 이용하여 잠수함의 전략을 연구하였다. Kim et al.[11]은 무인 항공기가 지상에 고정된 레이더의 탐지를 회피하고, 비행시간을 최소화하는 궤적 최적화를 제시하였으며, Scott[14], Randal et al.[13]은 Voronoi Diagram을 이용하여 무인 항공기의

최적 경로를 구성하였다. Chrlyle et al.[4]은 제한된 최단경로 알고리즘(Constrained Shortest Path Algorithm)을 이용하여 전투기와 무인 항공기의 연료를 고려한 비행경로를 구성하였다. Pollock[12]은 이동하는 표적을 Markov 과정으로 표현하고, 움직이는 표적을 탐색하기 위한 경로를 계획하였으며, Hong et al.[9, 10]은 휴리스틱을 이용하였다. Hohzaki & Iida[8]는 표적의 이동경로를 알고 있다고 가정한 후 이동경로에 확률을 주어 탐색하는 문제에 적용하였으며, 분지한계법(Branch and Bound Method)을 이용하였다.

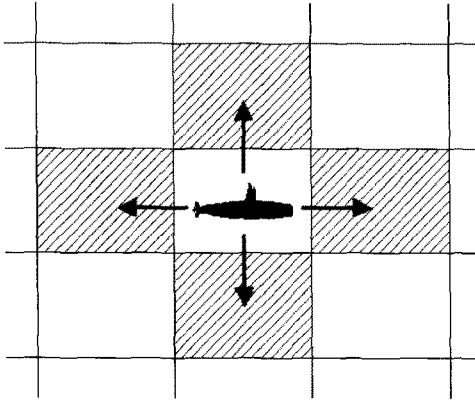
본 연구에서는 수상함에 의해 탐색활동이 이루어지고 있는 해역에서 임무를 수행하기 위하여 목표지점이나 표적에 접근하는 잠수함의 잠항능력을 고려하고, 생존율을 극대화하는 최적의 이동경로를 계획하였다. 잠수함의 이동경로를 구성하기 위한 수리모형을 구축하고, ILOG CPLEX를 이용하여 수리모형을 검증하였으며, 휴리스틱 알고리즘을 이용하여 해를 도출하였다.

2. 문제 정의 및 수리모형 구축

2.1 문제 정의

본 연구에서 다루고자 하는 문제는 여러 척의 수상함이 각각 할당된 해역에서 음파탐지기(Sonar)를 이용하여 잠수함을 탐색하고, 잠수함은 임무수행을 위해 모항을 출발한 후 생존율을 극대화하는 목표지점으로서의 최적 이동경로를 구성하는 문제이다. 잠수함은 수상함의 음파탐지기에 탐지되지 않기 위해 수상함을 회피하여 잠항하며, 부상으로 인한 노출을 방지하기 위하여 잠항능력을 고려하였다.

잠수함과 수상함은 주어진 공간을 벗어나지 않으며, 이를 활동 공간으로 정의한다. 모형을 위하여 활동 공간을 분할하여 사용하였으며, 분할된 공간을 '셀(Cell)'이라 하고, 셀 사이의 이동을 이



〈그림 1〉 4각형 셀에서의 이동 가능 경우

동경로로 정의한다. 셀의 넓이가 작을수록 현실과 유사하게 구현할 수 있으나 셀의 개수가 증가하게 되므로 문제의 복잡도가 커진다[5]. 셀의 형태는 활동공간을 분할하는 방법에 따라 결정되는데 본 연구에서는 4각형 형태의 셀을 사용하였으며, 이는 제자리를 포함한 인접 셀(5방향)로의 이동이 가능한 모형으로 다음 <그림 1>과 같다.

본 연구에서는 <그림 1>과 같은 4각형 형태의 셀로 이루어진 활동 공간에서 목표지점으로 이동하는 잠수함의 생존율을 극대화하는 최적의 이동 경로를 구성하고자 한다. 각 셀에서의 잠수함 생존율은 수상함에 탐지되지 않을 확률을 적용하였으며, 잠수함의 출발지점과 목표지점은 알려져 있는 것으로 모형을 구축하였다. 모형 구축을 위한 가정 사항은 다음과 같다.

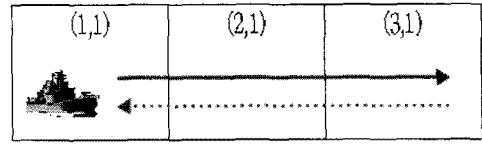
첫째, 잠수함 및 수상함은 활동 공간에서 단위 시간이 경과시에 제자리 및 인접 셀로만 이동하며, 매 시간 t 에서 하나의 셀에 위치한다.

둘째, 잠수함의 심도는 고려하지 않는다.

셋째, 수상함 음파탐지기의 잠수함 탐지거리 및 확률은 알려져 있다.

넷째, 지형(섬, 저수지, 항해 장애물 등)과 수상함의 유형 및 수, 탐색 시작지점 및 탐색 종료지점은 사전에 알려져 있다.

다섯째, 수상함의 탐색 패턴은 탐색 시작지점에서 탐색 종료지점 간을 지속적으로 왕복 기동 탐



〈그림 2〉 수상함 탐색 패턴

색하며, 탐색 시작 및 종료지점에서는 1회 제자리 탐색 후 인접 셀로 이동한다. 예를 들어, 다음 <그림 2>에서 단위시간에 따른 수상함의 탐색 패턴은 $[(1,1) \rightarrow (2,1) \rightarrow (3,1) \rightarrow (3,1) \rightarrow (2,1) \rightarrow (1,1) \rightarrow (1,1) \rightarrow (2,1) \rightarrow \dots]$ 이다.

2.2 수리모형 구축

본 연구의 수리모형에서 사용되는 용어와 결정 변수는 다음과 같다.

[용어]

i, j : 셀 $[i=j=(1,1), (1,2), \dots, (M,N)]$

s : 출발 셀

g : 목표 셀

d : 지형 셀

p : 임의의 셀

A_i : 셀 i 에서 다음 단위시간에 이동 가능한 인접 셀들의 집합

t : 잠수함의 목표 셀 도착시간 T 까지의 단위 시간($t=1, 2, \dots, T$)

S_R : 잠수함의 생존율

PD_j : 셀 j 에서 수상함의 잠수함 탐지확률

MT : 출발 셀에서 목표 셀까지의 최소 이동 소요 단위시간

FT : 잠수함의 최대 잠항 가능 단위시간

[결정변수]

$$x_{ijt} = \begin{cases} 1, & \text{단위시간 } t-1 \text{에서 } t \text{로 변화할 때 셀 } i \\ & \text{에서 셀 } j \text{로 잠수함이 이동하면} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases}$$

본 연구의 목적함수와 제약함수로 구성된 수리 모형은 다음과 같다.

Maximize

$$S_R = \prod_{j=(1,1)}^{(M,N)} \left\{ \sum_{i=(1,1)}^{(M,N)} \sum_{t=1}^T (1-PD_j) \cdot x_{ijt} \right\} \quad (1)$$

Subject to

$$\sum_{i=(1,1)}^{(M,N)} \sum_{j=(1,1)}^{(M,N)} \sum_{t=1}^T x_{ijt} \geq MT \quad (2)$$

$$\sum_{i=(1,1)}^{(M,N)} \sum_{j=(1,1)}^{(M,N)} \sum_{t=1}^T x_{ijt} \leq FT \quad (3)$$

$$\sum_{i=(1,1)}^{(M,N)} \sum_{t=1}^T x_{igt} = 1 \quad (4)$$

$$\sum_{j=(1,1)}^{(M,N)} \sum_{t=1}^T x_{sjt} = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{i=(1,1)}^{(M,N)} \sum_{t=1}^T x_{ipt} - \sum_{j=(1,1)}^{(M,N)} \sum_{t=1}^T x_{pjt} = 0, \quad (6)$$

$$p = (1,1), (1,2), \dots, (M,N)$$

$$\sum_{j \in A_i} \sum_{t=1}^T x_{ijt} = 1, \quad (7)$$

$$i = (1,1), (1,2), \dots, (M,N)$$

$$\sum_{i \in A_j} \sum_{t=1}^T x_{ijt} = 1, \quad (8)$$

$$j = (1,1), (1,2), \dots, (M,N)$$

$$\sum_{j=(1,1)}^{(M,N)} \sum_{t=1}^T x_{djt} = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{i=(1,1)}^{(M,N)} \sum_{t=1}^T x_{idt} = 0 \quad (10)$$

$$x_{ijt} = \begin{cases} 1, & \text{잠수함이 이동하면} \\ 0, & \text{그렇지 않으면} \end{cases}, \quad \forall i, j, t \quad (11)$$

본 수리모형의 목적함수 식(1)은 잠수함의 생존율을 극대화하는 것으로 이동경로상의 각 셀에서 잠수함이 수상함에 탐지되지 않을 확률의 곱으로 표현하였다. 제약함수 식(2)는 잠수함이 목표 셀에 반드시 도착해야 함을 의미하고, 제약함수 식(3)은 잠수함의 최대 잠항 가능 단위시간의 제약을 의미한다. 제약함수 식(4)와 식(5)는 잠수함의

출발과 도착은 출발 셀과 목표 셀에서만 이루어짐을 의미하며, 제약함수 식(6)은 잠수함이 임의의 셀로 이동한 후에 반드시 제자리 및 다른 셀로 출발해야 한다는 이동의 연속성을 나타낸다. 제약함수 식(7)과 식(8)은 제자리를 포함한 인접 셀로의 이동만 허용하는 제약이고, 제약함수 식(9)와 식(10)은 잠수함이 지형(육지, 섬, 저수심, 항해 장애물 등)으로의 이동을 할 수 없음을 의미하며, 제약함수 식(11)은 셀 간의 잠수함 이동이 있으면 1, 없으면 0을 나타내는 결정변수 제약이다.

3. 휴리스틱 알고리즘

여러 척의 수상함이 음파탐지기를 이용하여 잠수함을 탐색하는 해역에서 목표지점으로 이동하는 잠수함의 잠항 능력을 고려하고, 생존율을 극대화하는 최적의 이동경로를 구성하기 위한 휴리스틱 알고리즘을 구축하였다. 본 연구에서 제시한 휴리스틱 알고리즘은 잠수함의 이동이 가능하고, 서로 인접하여 연결된 셀에 대한 적합도(Fitness)를 평가한 후 이를 바탕으로 적합도가 극대화되도록 이동경로를 구성하는 알고리즘이다. 적합도 평가 함수는 잠수함의 생존율을 보장하고, 한 지점 주변에서 장시간 동안 잠항함으로써 최대 잠항 가능 단위시간 제약에 따른 무리한 항해를 방지하며, 목표지점을 향해 이동할 수 있도록 하기 위해 다음 식(12)와 같이 구축하였다.

적합도 평가 함수는 다음 단위시간에 이동 가능한 인접 셀에서 목표지점까지의 최소 이동 소요 단위시간(MT_{jg})에 가중치(α)를 곱하고, 현재 위치에서 다음 단위시간에 이동 가능한 인접 셀의 생존율(S_j)을 합하여 산출하였다. 가중치(α)는 가로 셀 크기와 세로 셀 크기의 합에 1/2을 곱하여 적용하였다.

$$Fitness = \alpha \cdot \frac{1}{MT_{jg}} + S_j, \quad (12)$$

$$j = (1,1), (1,2), \dots, (M,N)$$

본 연구에서 제시한 휴리스틱 알고리즘의 수행 절차는 다음과 같다.

- Step 1. 현재 셀에서 잠수함의 이동이 가능하고, 서로 인접한 셀에 대한 이동가능 경로를 선정한다.
- Step 2. 선정된 이동가능 경로에 대한 적합도를 평가한다.
- Step 3. 이동가능 경로 상에 있는 셀 중에서 적합도가 가장 큰 셀로 이동한다.
- Step 4. 이동가능 경로 상에 있는 셀 중에서 적합도가 가장 큰 셀이 복수로 존재하면 복수의 이동가능 셀을 후보경로로 선정한다.
- Step 5. 후보경로에 대하여 Step 1~Step 4를 반복하며, 복수의 후보경로 중에서 적

합도가 낮아지거나 최대 잠항 가능 단 위시간을 넘는 후보경로는 제거한다.

- Step 6. 목표지점에 도착한 후보경로 중에서 가장 생존율이 높고, 단위시간이 짧은 후보경로를 최종 이동경로로 선정한다.

4. 실험 결과 분석

4.1 실험 계획

본 연구에서는 음파탐지기의 성능이 다른 3종류의 수상함(A형, B형, C형)이 각각 할당된 해역에서 음파탐지기를 이용하여 잠수함을 탐색하고, 잠수함이 임무를 수행하기 위하여 목표지점으로 이동하는 예제에 대하여 실험하였다. 활동 공간은 100개(10×10), 200개(20×10), 225개(15×15), 400

<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>0.25</td><td>0.25</td><td>0.25</td><td></td></tr> <tr><td>0.25</td><td>0.5</td><td>0.25</td><td></td></tr> <tr><td>0.25</td><td>0.25</td><td>0.25</td><td></td></tr> </table> <p>A형[1칸(1×1)]</p>								0.25	0.25	0.25		0.25	0.5	0.25		0.25	0.25	0.25		<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.125</td><td>0.125</td><td>0.125</td><td>0.125</td><td>0.125</td><td>0.125</td><td>0.125</td><td>0.125</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.125</td><td>0.375</td><td>0.375</td><td>0.375</td><td>0.375</td><td>0.375</td><td>0.375</td><td>0.125</td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.125</td><td>0.375</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.375</td><td>0.125</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.125</td><td>0.375</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.375</td><td>0.125</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.125</td><td>0.375</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.375</td><td>0.125</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.125</td><td>0.375</td><td>0.375</td><td>0.375</td><td>0.375</td><td>0.375</td><td>0.125</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.125</td><td>0.125</td><td>0.125</td><td>0.125</td><td>0.125</td><td>0.125</td><td>0.125</td><td></td><td></td></tr> </table> <p>B형[9칸(3×3)]</p>																			0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125			0.125	0.375	0.375	0.375	0.375	0.375	0.375	0.125			0.125	0.375	0.5	0.5	0.5	0.375	0.125				0.125	0.375	0.5	0.5	0.5	0.375	0.125				0.125	0.375	0.5	0.5	0.5	0.375	0.125				0.125	0.375	0.375	0.375	0.375	0.375	0.125				0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125																										
				0.25	0.25	0.25																																																																																																																													
				0.25	0.5	0.25																																																																																																																													
0.25	0.25	0.25																																																																																																																																	
	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125																																																																																																																											
	0.125	0.375	0.375	0.375	0.375	0.375	0.375	0.125																																																																																																																											
	0.125	0.375	0.5	0.5	0.5	0.375	0.125																																																																																																																												
	0.125	0.375	0.5	0.5	0.5	0.375	0.125																																																																																																																												
	0.125	0.375	0.5	0.5	0.5	0.375	0.125																																																																																																																												
	0.125	0.375	0.375	0.375	0.375	0.375	0.125																																																																																																																												
	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125																																																																																																																												
<table border="1"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td></tr> <tr><td></td><td>0.085</td><td>0.255</td><td>0.255</td><td>0.255</td><td>0.255</td><td>0.255</td><td>0.255</td><td>0.255</td><td>0.255</td><td>0.085</td></tr> <tr><td></td><td>0.085</td><td>0.255</td><td>0.425</td><td>0.425</td><td>0.425</td><td>0.425</td><td>0.425</td><td>0.425</td><td>0.255</td><td>0.085</td></tr> <tr><td></td><td>0.085</td><td>0.255</td><td>0.425</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.425</td><td>0.255</td><td>0.085</td></tr> <tr><td></td><td>0.085</td><td>0.255</td><td>0.425</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.425</td><td>0.255</td><td>0.085</td></tr> <tr><td></td><td>0.085</td><td>0.255</td><td>0.425</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.425</td><td>0.255</td><td>0.085</td></tr> <tr><td></td><td>0.085</td><td>0.255</td><td>0.425</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.5</td><td>0.425</td><td>0.255</td><td>0.085</td></tr> <tr><td></td><td>0.085</td><td>0.255</td><td>0.425</td><td>0.425</td><td>0.425</td><td>0.425</td><td>0.425</td><td>0.425</td><td>0.255</td><td>0.085</td></tr> <tr><td></td><td>0.085</td><td>0.255</td><td>0.255</td><td>0.255</td><td>0.255</td><td>0.255</td><td>0.255</td><td>0.255</td><td>0.255</td><td>0.085</td></tr> <tr><td></td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td><td>0.085</td></tr> </table> <p>C형[25칸(5×5)]</p>																							0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085		0.085	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.085		0.085	0.255	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.255	0.085		0.085	0.255	0.425	0.5	0.5	0.5	0.5	0.425	0.255	0.085		0.085	0.255	0.425	0.5	0.5	0.5	0.5	0.425	0.255	0.085		0.085	0.255	0.425	0.5	0.5	0.5	0.5	0.425	0.255	0.085		0.085	0.255	0.425	0.5	0.5	0.5	0.5	0.425	0.255	0.085		0.085	0.255	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.255	0.085		0.085	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.085		0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085
	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085																																																																																																																									
	0.085	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.085																																																																																																																									
	0.085	0.255	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.255	0.085																																																																																																																									
	0.085	0.255	0.425	0.5	0.5	0.5	0.5	0.425	0.255	0.085																																																																																																																									
	0.085	0.255	0.425	0.5	0.5	0.5	0.5	0.425	0.255	0.085																																																																																																																									
	0.085	0.255	0.425	0.5	0.5	0.5	0.5	0.425	0.255	0.085																																																																																																																									
	0.085	0.255	0.425	0.5	0.5	0.5	0.5	0.425	0.255	0.085																																																																																																																									
	0.085	0.255	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.425	0.255	0.085																																																																																																																									
	0.085	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.255	0.085																																																																																																																									
	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085																																																																																																																									

〈그림 3〉 수상함 음파탐지기의 탐지거리별 탐지확률

개(20×20)로 구성된 4각형 형태의 셀을 이용하였으며, 육지나 섬, 저수심, 항해 장애물 등과 같이 잠수함의 잠항이 불가능한 지형에서의 생존율은 0을 반영하였고, 잠수함과 수상함은 단위시간당 셀 1칸 이동하는 것을 적용하였다.

해군에서는 해양환경을 조사하고, 축적된 자료를 바탕으로 해당일시 및 해당해역의 잠수함 탐지 가능거리를 예측하는 음탐거리 예보를 실시하며, 이때 음탐접촉 예상거리는 수중에서 활동하는 잠수함을 50%의 확률로 탐지할 수 있는 거리를 의미한다[1, 2]. 본 연구에서는 수상함이 보유한 음파탐지기의 음탐접촉 예상거리를 함형별 음파탐지기 성능에 따라 A형 셀 1칸(1×1), B형 셀 9칸(3×3), C형 셀 25칸(5×5)으로 적용하였으며, 탐지 확률은 음탐접촉 예상거리까지의 셀에 50%를 적용하였다. 음탐접촉 예상거리 밖의 셀은 정규분포 종형 그래프를 이용하였으며, 확률 값 1에서 셀 1칸 간격에 해당하는 표준정규분포 누적확률의 중

간 값을 뺀 확률 값을 적용하였다. 수상함 음파탐지기의 탐지거리별 탐지확률은 다음 <그림 3>과 같다.

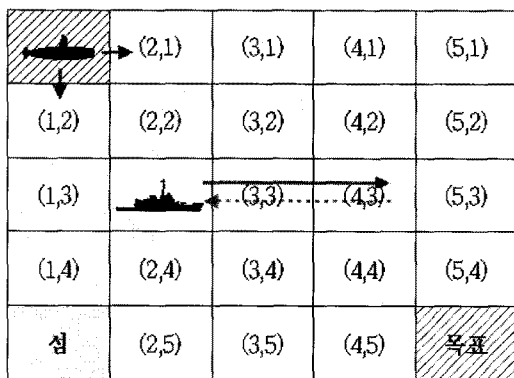
4.2 수리모형 타당성 및 휴리스틱 알고리즘 유효성 검증

본 연구에서 제안한 수리모형의 타당성과 휴리스틱 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 예제 1을 축소시켜 실험하였으며, 축소실험 예제의 데이터는 다음 <표 1>과 같다. 축소실험 예제의 활동 공간에 잠수함, 수상함, 지형의 데이터를 그림으로 도식하면 다음 <그림 4>와 같다.

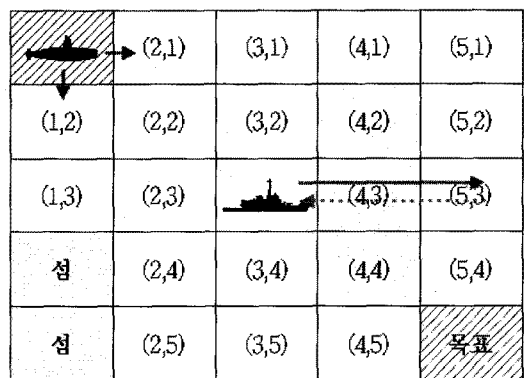
CPLEX에서는 비선형 목적함수를 다룰 수 없으므로 비선형함수 형태인 본 연구의 목적함수 식(1)에 대수(Logarithm)를 취하여 다음 식(13)과 같이 선형함수로 변환하였으며, 탐색된 결과를 다시 지수 환원하여 원문제의 목적함수 값을 구하였다.

<표 1> 축소실험 예제 데이터

예제	활동 공간	잠수함 (출발지점, 목표지점, 잠항능력)	수상함 (유형, 탐색 시작지점, 탐색 종료지점)	지형 (유형, 위치)
1	25개 (5×5)	(1,1), (5,5), 12단위시간	A, (2,3), (4,3)	섬, (1,5)
2			A, (3,3), (5,3)	섬, [(1,4), (1,5)]



[축소실험 예제 1]



[축소실험 예제 2]

<그림 4> 축소실험 예제

〈표 2〉 축소실험 결과

구 분		이동 경로	이동 단위시간	생존율	계산시간(초)
축소실험 예제 1	CPLEX	(1,1)→(2,1)→(3,1)→(4,1) →(5,1)→(5,2)→(5,3)→(5,4)→(5,5)	8	1.000	2.88
	휴리스틱	(1,1)→(2,1)→(3,1)→(4,1) →(5,1)→(5,2)→(5,3)→(5,4)→(5,5)	8	1.000	0.38
축소실험 예제 2	CPLEX	(1,1)→(1,2)→(1,3)→(2,3)→(2,4) →(2,5)→(3,5)→(4,5)→(5,5)	8	1.000	3.74
	휴리스틱	(1,1)→(1,2)→(1,3)→(2,3)→(2,4) →(2,5)→(3,5)→(4,5)→(5,5)	8	1.000	0.38

$$\text{Maximize } \ln S_R$$

$$= \ln \left[\prod_{j=(1,1)}^{(M,N)} \left\{ \sum_{i=(1,1)}^{(M,N)} \sum_{t=1}^T (1-PD_j) \cdot x_{i,j,t} \right\} \right] \quad (13)$$

$$= \sum_{j=(1,1)}^{(M,N)} \sum_{i=(1,1)}^{(M,N)} \sum_{t=1}^T \ln(1-PD_j) \cdot x_{i,j,t}$$

축소실험 예제에 CPLEX와 휴리스틱 알고리즘을 이용하여 잠수함의 이동경로와 이동 단위시간, 생존율 및 계산시간을 산출한 후 비교하였으며, 축소실험 결과는 다음 <표 2>와 같다.

CPLEX와 휴리스틱 알고리즘을 이용한 축소실험 결과 이동 단위시간, 생존율, 이동경로가 동일하게 산출되었으며, 계산시간은 휴리스틱 알고리

즘이 0.38초로 2.88~3.74초가 소요된 CPLEX에 비해 빠른 것으로 나타났다. CPLEX를 이용하여 최적해를 산출하였고, 휴리스틱 알고리즘의 실험 결과가 CPLEX와 동일하며, 빠른 계산시간을 도출함으로써 본 연구에서 제시한 수리모형의 타당성과 휴리스틱 알고리즘의 유효성을 입증하였다.

4.3 실험 결과

수상함이 탐색활동을 수행하는 해역에서 잠수함의 잠항능력을 고려하여 생존율을 극대화하는 이동경로를 계획하기 위해 휴리스틱 알고리즘을 이용하여 실험하였다. 실험 예제별 활동 공간, 잠수함(출발지점, 목표지점, 잠항능력), 수상함(유형, 잠항능력), 탐색활동(유형, 탐색 시작지점, 탐색 종료지점), 지형(유형, 위치)를 고려하여 실험하였다.

〈표 3〉 실험 예제 데이터

예제	활동 공간	잠수함 (출발지점, 목표지점, 잠항능력)	수상함 (유형, 탐색 시작지점, 탐색 종료지점)	지형 (유형, 위치)
1	100개 (10×10)	(1,1), (10,10), 25단위시간	A, (3,2), (4,2) / A, (1,5), (1,6) A, (9,5), (9,6) / B, (2,8), (4,8)	섬, (5~6,3~4)
2	200개 (20×10)	(1,9), (19,1), 35단위시간	A, (7,9), (7,10) / A, (18,3), (19,3) B, (2,4), (4,4) / B, (9,1), (11,1) B, (16,7), (16,9)	섬, (19~20,19~20) 저수심, (1~2,1~2)
3	225개 (15×15)	(1,1), (14,14), 40단위시간	A, (1,4), (2,4) / A, (8,1), (8,2) A, (14,7), (15,7) / B, (5,5), (5,7) B, (13,2), (13,4) / C, (3,12), (6,12)	육지, [(13~14,15), (15,13~15)]
4	400개 (20×20)	(20,2), (1,18), 50단위시간	A, (7,19), (7,20) / A, (14,4), (14,5) A, (19,6), (19,7) / A, (10,14), (11,14) B, (4,12), (4,14) / B, (10,7), (12,7) C, (4,4), (7,4) / C, (17,14), (17,17)	섬, (12~15, 1~3) 저수심, (1~3,19~20) 항해 장애물, [(1,16), (2,8), (8,11), (14,16)]

〈표 4〉 실험 결과

예제	이동 경로	이동 단위시간	생존율	계산시간(초)
1	(1,1)→(1,2)→(2,2)→(2,3)→(1,3)→(1,3)→(2,3)→(2,4)→(3,4) →(4,4)→(4,4)→(4,4)→(4,4)→(4,4)→(4,5)→(5,5)→(6,5) →(7,5)→(7,6)→(7,7)→(8,7)→(9,7)→(9,8)→(9,9)→(9,10)→(10,10)	25	0.669	1.094
2	(1,9)→(2,9)→(3,9)→(3,8)→(4,8)→(5,8)→(6,8) →(7,8)→(7,7)→(8,7)→(9,7)→(9,6)→(10,6)→(11,6) →(11,5)→(12,5)→(13,5)→(13,4)→(13,3)→(13,2) →(14,2)→(15,2)→(16,2)→(16,1)→(17,1)→(18,1)→(19,1)	26	0.875	1.312
3	(1,1)→(2,1)→(3,1)→(4,1)→(5,1)→(6,1)→(6,1) →(6,1)→(6,2)→(6,3)→(6,2)→(6,1)→(6,1)→(6,1) →(6,2)→(6,3)→(7,3)→(8,3)→(9,4)→(9,5) →(9,6)→(10,7)→(10,8)→(10,9)→(10,10)→(11,10) →(12,10)→(12,11)→(12,12)→(12,13)→(12,14)→(13,14)→(14,14)	34	0.701	1.485
4	(20,2)→(19,2)→(18,2)→(18,3)→(17,3)→(16,3) →(16,4)→(16,5)→(16,6)→(16,7)→(16,8)→(15,8) →(14,8)→(14,9)→(15,9)→(16,9)→(16,8)→(15,8) →(15,9)→(15,10)→(15,11)→(14,11)→(13,11)→(12,11) →(12,12)→(11,12)→(10,12)→(9,12)→(8,12)→(8,13) →(8,14)→(8,15)→(8,16)→(8,17)→(8,18)→(7,18) →(6,18)→(5,18)→(4,18)→(3,18)→(2,18)→(1,18)	41	0.627	3.204

: 제자리 또는 한 지점 주변 잠항, ■■■■■: 수상함 탐지거리내 잠항

탐색 시작지점, 탐색 종료지점, 지형(육지, 섬, 저수지, 항해 장애물 등)은 다음 <표 3>과 같으며, 휴리스틱 알고리즘을 이용한 실험 결과는 다음 <표 4>와 같다.

100(10×10)개의 활동 공간에서 수상함 4척이 탐색하는 예제 1의 경우 잠수함은 수상함의 탐색 패턴을 고려하여 제자리 또는 한 지점 주변에서 2회(4, 5단위시간) 잠항하였고, 수상함의 탐지거리 내에서 1회(3단위시간) 잠항하였으며, 잠수함의 총 이동 단위시간은 25, 생존율 0.669를 도출하였다.

200(20×10)개의 활동 공간, 수상함 5척이 탐색하는 예제 2에서 잠수함은 총 이동 단위시간은 26, 생존율 0.875를 도출하였으며, 수상함의 탐지거리 내에서 1회(1단위시간) 잠항하였다.

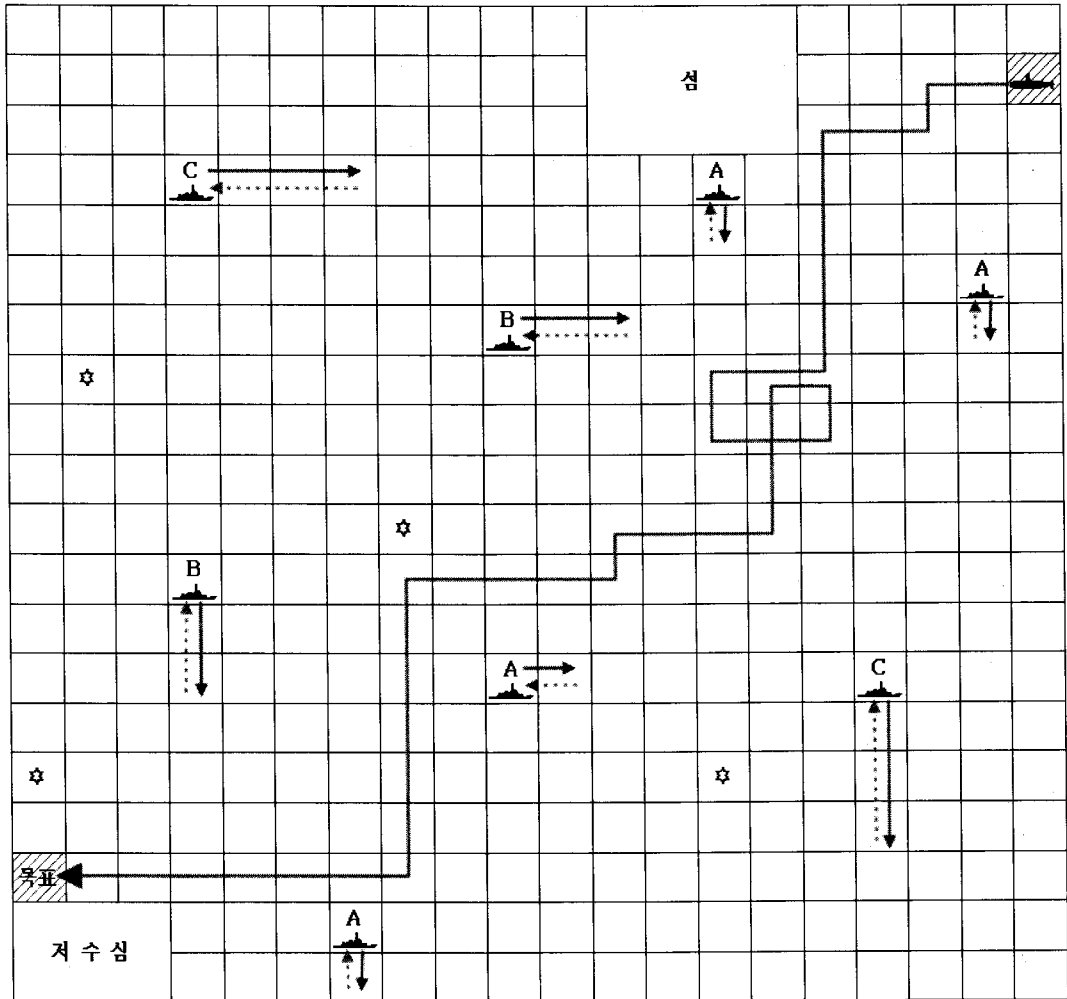
225(15×15)개의 활동 공간, 수상함 6척이 탐색하는 예제 3에서 잠수함은 수상함의 탐색 패턴을 고려하여 11 단위시간동안 제자리 또는 한 지점 주변에서 잠항하였고, 수상함의 탐지거리 내에서

2회(1, 2단위시간) 잠항하였으며, 잠수함의 총 이동 단위시간은 34, 생존율 0.701을 도출하였다.

400(20×20)개의 활동 공간, 수상함 8척이 탐색하는 예제 4에서 잠수함은 수상함의 탐색 패턴을 고려하여 7 단위시간동안 한 지점 주변에서 잠항하였고, 수상함의 탐지거리 내에서 2회(1, 2단위시간) 잠항하였으며, 잠수함의 총 이동 단위시간은 41, 생존율 0.627을 도출하였다. 휴리스틱 알고리즘의 계산시간은 1.094~3.204초로 산출되어 탐색속도가 빠른 것으로 나타났다. 예제 4의 잠수함의 이동경로는 다음 <그림 5>와 같다.

5. 결 론

본 연구는 여러 척의 수상함이 음파탐지기를 이용하여 탐색활동을 수행하는 해역에서 목표지점으로 이동하는 잠수함의 잠항 능력을 고려하고,



〈그림 5〉 잠수함 이동경로(예제 4)

생존율을 극대화하는 최적의 이동경로를 계획하였다. 잠수함의 생존율을 극대화하기 위한 이동경로 계획 수리모형을 구축하고, ILOG CPLEX를 이용하여 수리모형을 검증하였다. 잠수함의 생존율을 보장하고, 목표지점으로 이동하기 위한 휴리스틱 알고리즘을 이용하여 이동경로, 이동 단위시간(거리), 생존율, 계산시간을 도출하였다. 본 연구에서 제안한 휴리스틱 알고리즘은 수상함의 탐색 패턴을 고려하여 제자리 또는 한 지점 주변에서 잠항함으로써 생존율을 극대화하는 경로를 도출하였으며, 탐색속도가 빠른 것으로 나타났다.

잠수함의 이동경로를 계획함에 있어 이동가능

경로를 확장하여 적합도를 평가한다면 더 높은 생존율을 가지는 이동경로를 계획할 수 있을 것이며, 현재의 수상함 탐색구역 및 패턴을 바탕으로 도출된 잠수함의 이동경로를 고려한다면 수상함의 탐색구역 및 패턴 결정에 도움이 될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 해군본부, “해군군사용어사전,” 2007.
- [2] 해군본부, “해군규정 제3권(해군 해양·음향업무 규정),” 2009.

- [3] Baston, V. J. and F. A. Bostok, "A One-Dimensional Helicopter-Submarine Game," *Naval Research Logistics*, Vol.36, No.4(1989), pp.479-490.
- [4] Carlyle, W. M., J. O. Royset, and R. K. Wood, "Routing Military Aircraft with a Constrained Shortest-path Algorithm," Naval Postgraduate School, 2007.
- [5] Cho, S. J., "Fast Heuristic Algorithm for the Constrained Paths Moving Target Search Problems," Seoul National University, Ph.D. Thesis, 2008
- [6] Chuan, E. C., "A Helicopter Submarine Search Game," Naval Postgraduate School, Master's Thesis, 1988.
- [7] Danskin, J. M., "A Helicopter Versus Submarine Search Game," *Operations Research*, Vol.16, No.3(1968), pp.509-517.
- [8] Hohzaki, R. and K. Iida, "Optimal Strategy of Route and Look for the Path Constrained Search Problem with Reward Criterion," *European Journal of Operational Research*, Vol.100, No.1(1997), pp.236-249.
- [9] Hong, S. P., S. J. Cho, and M. J. Park, "A Pseudo-polynomial heuristic for Path-constrained Discrete-time Markovian-target Search," *European Journal of Operational Research*, Vol.193, No.2(2009), pp.351-364.
- [10] Hong, S. P., S. J. Cho, M. J. Park, and M. G. Lee, "Optimal Search-relocation Trade-off in Markovian-target Searching," *Computers and Operations Research*, Vol.36, No.6(2009), pp.2097-2104.
- [11] Kim, B. S., C. K. Ryoo, H. C. Bang, and E. H. Chung, "Optimal Path Planning for UAVs under Multiple Ground Threats," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.34, No.1(2006), pp.74-80.
- [12] Pollock, S. M., "A Simple Model of Search for a Moving Target," *Operations Research*, Vol.18, No.5(1970), pp.883-903.
- [13] Randal, W. B., W. M. Timothy, and G. Michael, "Coordinated Target Assignment and Intercept for Unmanned Air Vehicles," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.18, No.6(2002), pp.80-91.
- [14] Scott A. B., "Path Planning for UAVs," *Proceedings of the American Control Conference*, Chicago, Illinois, 2000.
- [15] Shupenus, J. and D. Barr, "Information Loss due to Target Mobility," *Military Operations Research*, Vol.4(2000), pp.31-43.
- [16] Thomas, L. C. and A. R. Washburn, "Dynamic Search Games," *Operations Research*, Vol.39, No.3(1991), pp.415-422.
- [17] Washburn A. R. and R. Hohzaki, "The Diesel Submarine Flaming Datum Problem," *Military Operations Research*, Vol.6, No.4(2001), pp.19-30.

저자 소개

김 기 태(E-mail: navystar52@naver.com)

- 1998 해군사관학교 기계공학과 졸업(학사)
- 2008 국방대학교 운영분석학과 졸업(석사)
- 현재 국방대학교 운영분석학과 박사과정
- 관심분야 군사 OR, 조합최적화, 경로문제, 메타휴리스틱, 신뢰도

박 세 훈(E-mail: fox6410@paran.com)

- 1994 공군사관학교 항공공학과 졸업(학사)
- 2006 국방대학교 국방관리학과 졸업(석사)
- 현재 국방대학교 국방관리학과 박사과정
- 관심분야 SCM, 수요예측, 시뮬레이션, 최적화

조 성 진(E-mail: pkm366@snu.ac.kr)

- 1994 경기대학교 환경공학과 졸업(학사)
- 2002 국방대학교 운영분석학과 졸업(석사)
- 2008 서울대학교 산업공학과 졸업(박사)
- 현재 국방대학교 운영분석학과 교수
- 관심분야 군사 OR, 최적화, 국방 M&S, 탐색이론, 전투모형

전 건 옥(E-mail: g0jeon01@yahoo.co.kr)

- 1984 공군사관학교 전자공학과 졸업(학사)
- 1993 고려대학교 산업공학과 졸업(석사)
- 1999 미국 Univ. of Louisville 산업공학과 졸업(박사)
- 2009 미국 Rutgers University 교환교수
- 현재 국방대학교 운영분석학과 교수
- 관심분야 최적화기법 응용, 신뢰도 분석, 공중시험평가, 사전 및 비용분석