

## 회피 기동에 강인한 수상 항적 탐색 방법

### Robust Ship Wake Search Method in the Target Evasion Environment

구본화*	이영현*	박정민*	정석문**
Bonhwa Ku	Younghyun Lee	Jungmin Pak	Sukmoon Chung
홍우영**	김우식***	임묘택*	고한석*
Wooyoung Hong	Wooshik Kim	Myotaeg Lim	Hanseok Ko

#### Abstract

This paper proposes robust ship wake search method in the target evasion environment. Moving surface ships generate a long trailing wake in the rear of a surface ship. Wake homing torpedo sensing this wake can detect the surface target and engage it automatically. In wake homing torpedo, wake search method is important element to maximize effectiveness of wake homing torpedo. This paper proposes one-side, two-side and centering mode according to passing wake boundary scenarios. Also, wake deflection angle is deduced by using the principle of deflection angle of acoustic torpedo. The representative experimental results using monte-carlo simulation demonstrate that the searching method using one-side mode is superior to two-side and centering mode in the target evasion environment.

Keywords : Wake Search(항적 탐색), Wake Modeling(항적 모델링), Wake Homing Torpedo(항적 추적 어뢰), Wake Deflection Angle(항적 초기 발사각)

#### 1. 서론

어뢰 대항 기술의 발전은 효과적인 음향 어뢰의 무력화를 불러 일으켰다. 이에 표적 후미에 생성되는 항적 정보를 이용하는 어뢰의 개발이 대두되었으며,

몇몇 선진국에서는 이에 대한 연구를 수십 년 전부터 진행해 오고 있다<sup>[1]</sup>. 항적 추적 어뢰(Wake Homing Torpedo)는 수상함 표적이 항해를 하게 되면 그 후면에 생성되는 항적을 주변으로부터 식별하고, 그 정보를 이용해 표적을 탐지하고 추적하는 어뢰의 한 방식이다. 항적 추적 어뢰는 기존 기만기의 동작에 영향을 받지 않기 때문에 무기체계로서 그 위협도가 크다고 할 수 있다. 항적의 면적이 넓고 지속 시간이 긴 수상함정에는 매우 위협적인 공격 무기 체계이다<sup>[1]</sup>.

항적 추적 어뢰의 성능을 극대화하기 위해서는 효율적인 탐색 방법에 대한 연구가 선행되어야 한다<sup>[2]</sup>.

\* 2008년 12월 2일 접수~2009년 1월 16일 게재승인

\* 고려대학교 전기전자전파공학과

\*\* 해군사관학교 정보통신공학과

\*\*\* 국방과학연구소(ADD)

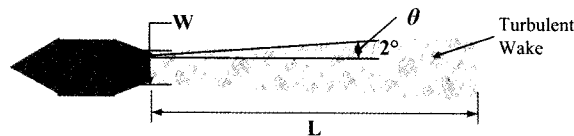
책임저자 : 고한석(hsko@ispl.korea.ac.kr)

본 논문에서는 수상 표적에서 발생하는 항적을 효율적으로 탐색하는 방법을 제안한다. 항적 탐색 방법은 통과하는 항적 경계면에 따라서 단측, 양측, 중앙 모드의 탐색 방법을 제시한다. 특히, 적의 공격을 감지하게 되면 표적은 회피 기동을 하기 때문에 이에 강인한 탐색 방법을 도출한다. 실제 수상함의 항적은 표적의 종류 및 속도, 해상 상태에 따라 변동된다<sup>3~6</sup>. 본 논문에서는 수상함의 폭, 항적 소멸 시간, 발산각을 통해 항적 생성 모델을 단순화하였다. 어뢰의 항적 탐지 유무를 판단하기 위해서는 탐지기를 설계해야 한다. 본 논문에서의 관심은 탐지기 부분이 아니라 탐색 방법에 대한 것이므로 탐지 유무는 어뢰가 항적 내부에 들어 가게 된다면 항적을 항시 탐지 가능하다고 가정하였다. 또한, 항적 내부에서는 동일한 항적 세기를 가진다고 가정한다. 제안한 항적 탐색 방법은 Monte-Carlo 실험을 통해 효용성을 고찰한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 항적 모델 및 탐지 모델에 대해서 다룬다. 3장에서는 항적 탐색 방법을 제시하며, 4장에서는 제안된 탐색 방법의 모의실험을 통해 효율적인 탐색 방법을 알아본다.

## 2. 항적 모델 및 탐지 모델

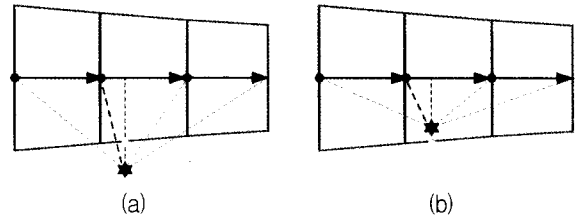
수상함의 항적은 수상함의 종류와 속도, 해상 상태에 따라 다르게 나타난다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 수상함의 폭  $W$ , 항적의 길이  $L$ , 항적이 퍼지는 각도  $\theta$ 를 통한 항적 생성 모델을 가정하였다<sup>3~6</sup>. 수상함의 항적은 수상함의 후면에 생성되며, 수상함에서 멀어질수록  $\theta$ 에 따라 너비가 넓어진다. 실제로 항적은 수상함이 지나온 위치의 좌우에 발생되므로 수상함의 위치와 진행 방향에 따른 자취 정보를 통해 수치적인 항적 모델을 생성하였다.



[그림 1] 수상함 항적 모델링

어뢰의 항적 탐지 유무를 판단하기 위해 어뢰의 위치와 수상함의 자취 지점의 기하학적 구조를 이용한다. 어뢰의 위치로부터 가장 가까운 수상함 자취 지점

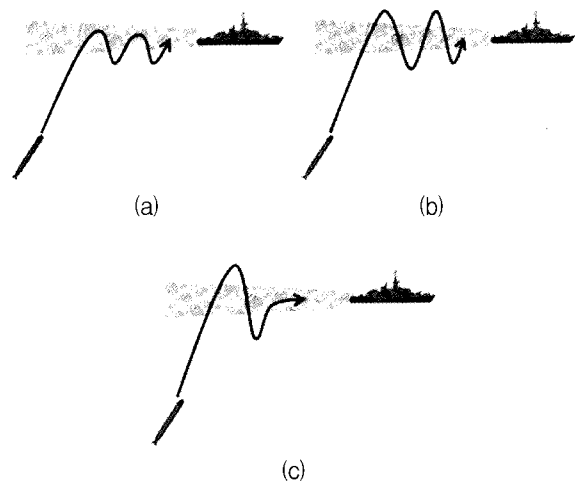
을 찾아 수상함 진행 자취선에 투영한다. 투영된 위치의 항적 너비를 보간법으로 추측하고 어뢰 위치와의 거리와 비교하여, 어뢰 위치와의 거리가 추측된 항적 너비보다 짧을 경우 현재 어뢰가 항적을 탐지하였다고 판단한다. 그림 2 (a)는 어뢰가 항적을 탐지하지 못한 경우이고, 그림 2 (b)는 탐지한 경우이다. 별표는 어뢰의 위치이며, 파란 점과 화살표는 수상함의 자취 지점과 진행 방향, 그리고 사선은 항적 경계면이다.



[그림 2] 항적 탐지 방법

## 3. 항적 탐색 방법

초기 발사 후 직진 운동을 수행하던 어뢰는 항적이 탐지된 이후, 수상함 표적 격침을 위한 항적 탐색 운동을 실시한다. 항적 어뢰의 탐색 방법은 그림 3과 같이, 단측 모드, 양측 모드, 중앙 모드를 사용한다. 단측 모드는(a) 항적의 한쪽 경계를 확인하며 표적에 접근하며, 양측 모드는(b) 항적의 양쪽 경계를 확인하며 표적에 접근하게 된다. 중앙 모드는(c) 항적 경계 확

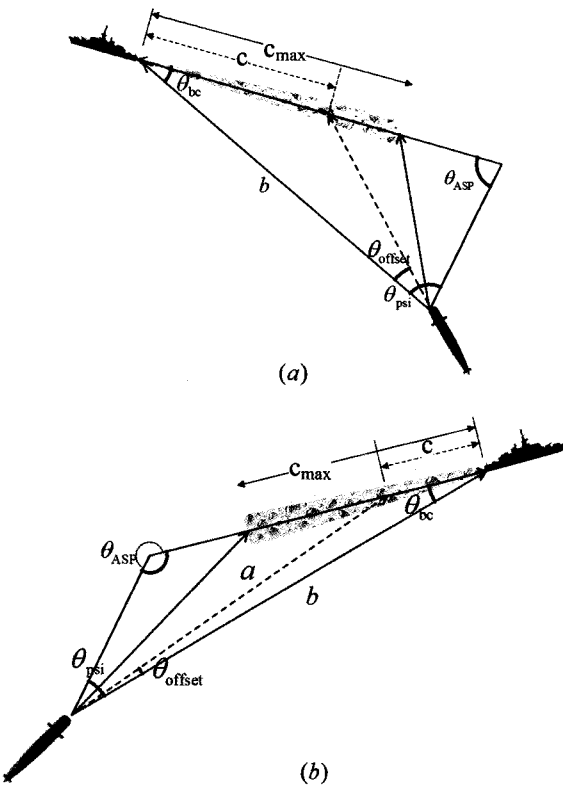


[그림 3] 항적 탐색 방법

인 후 항적 내로 진입한 뒤, 표적을 향해 직진 주행하면서 표적에 접근한다. 항적 탐색 도중 항적을 소실할 경우에는 항적이 재탐지 될 때까지 항적 재탐색 운동을 하며, 항적이 재탐지된 이후 다시 표적 격침을 위한 항적 탐색 운동을 한다.

가. 항적 초기 발사각 및 회전 방향 설정

항적 어뢰가 효과적으로 운용되기 위해서는 우선적으로 항적이 존재하는 방향으로 어뢰를 발사해야 된다. 본 논문에서는 TMA(Target Motion Analysis)를 통해 추정된 수상함 표적의 진행 방향과 표적 속도, 어뢰 속도, 항적의 길이를 이용하여 항적 진입을 위한 초기 발사각을 유도하였다. 그림 4와 같은 기하학적 구조를 통해 예상 요격 지점을 결정하고 표적 후면에 생성되는 항적에 어뢰가 도달할 수 있도록 발사각을 설정한다.



[그림 4] 어뢰 초기 발사각 설정

항적을 향한 초기 발사각  $\theta_{wpsi}$  는 식 (1)과 같이 공격각  $\theta_{ASP}$  에 따라 구분되어 계산된다. 여기서 공격각

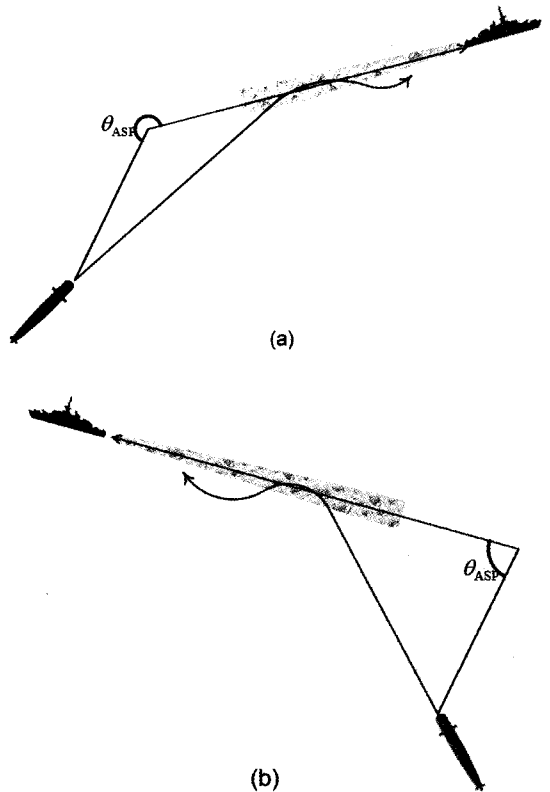
은 표적과 어뢰의 초기 위치를 연결한 선에서 표적 진행 방향까지의 시계 방향 각도를 의미한다. 그림 4 (a)는 공격각이  $180^\circ$  보다 작은 경우, (b)는 공격각이  $180^\circ$  보다 큰 경우이다.  $\theta_{psi}$  는 표적을 향한 발사각이며,  $\theta_{offset}$  은 입수 거리  $c$ 에 따른 발사 조절각이다.

$$\begin{cases} \theta_{wpsi} = \theta_{psi} - \theta_{offset}, & \theta_{ASP} \leq 180 \\ \theta_{wpsi} = \theta_{psi} + \theta_{offset}, & \theta_{ASP} > 180 \end{cases} \quad (1)$$

$$\theta_{psi} = \sin^{-1} \left( \frac{V_T \times \sin \theta_{ASP}}{V_M} \right) \quad (2)$$

$$\theta_{offset} = \cos^{-1} \left( \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2ab} \right) \quad (3)$$

여기서  $V_T$ 는 표적의 속력이고,  $a$ 는 어뢰 발사 위치에서 예상 항적 진입 지점까지의 거리,  $b$ 는 어뢰의 발사 위치와 예상 요격 지점 사이의 거리이다.



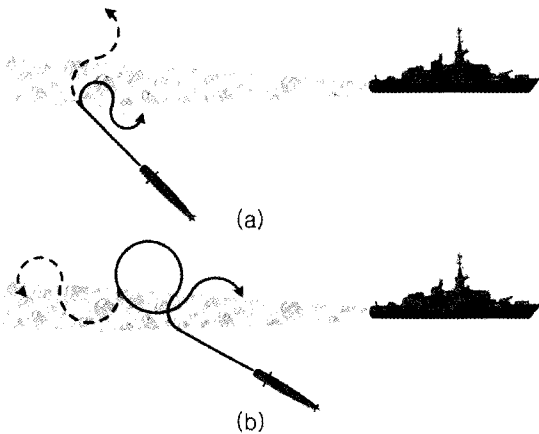
[그림 5] 초기 회전 방향

초기 발사각에 따라 직진 운동을 수행하던 어뢰는 항적이 탐지된 이후, 수상함 표적 격침을 위한 항적 탐색 운동을 실시한다. 이를 위해서는 항적 진입 후 어뢰의 첫 회전 방향을 결정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 그림 5와 같이 공격각을 기준으로 첫 회전 방향을 결정한다. 공격각이  $180^\circ$  보다 큰 경우에는 초기 회전 방향을 우측으로 설정하며(a), 공격각이  $180^\circ$  보다 작은 경우에는 초기 회전 방향을 좌측으로 설정한다(b). 이후 탐색 운동을 통해 표적에 접근하는 탐색 구조를 갖는다.

나. 단측 모드 탐색

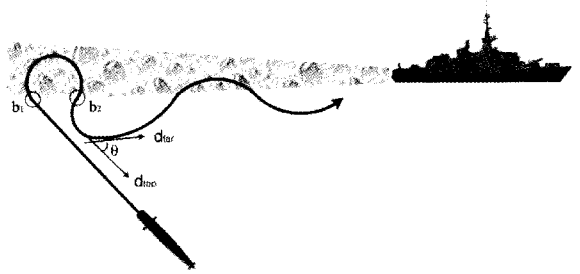
항적을 처음으로 탐지한 어뢰는 항적 내에서 초기 회전 방향에 따라 최대 각속도로 회전 운동을 한다. 이것은 그림 6 (a)와 같이 회전 각속도가 작아 회전 반경이 클 경우 항적을 이탈할 가능성이 있기 때문이다. 그러나 항적의 폭이 어뢰의 최소 회전 반경 보다 좁은 경우에는 최대 각속도로 회전하여도 항적을 이탈하는 문제가 발생한다.

이 문제는 그림 6 (b)와 같은 방법을 통해 해결할 수 있다. 항적에 첫 진입한 어뢰가 항적 밖으로 나간 후 다시 들어올 때 일정 각도 이상 회전할 경우 회전 방향을 이전 방향과 같은 방향으로 유지함으로써 표적 진행 방향으로 어뢰가 운동할 수 있다. 그러나 어뢰가 최대 각속도로 회전하게 되면 어뢰가 항적을 빠져나오지 못하고 항적 내에서 반복적인 원운동을 하는 문제가 발생할 수 있다. 이 문제는 항적 내부에서 어뢰가  $360^\circ$  회전할 경우 회전 방향을 바꿔 어뢰가 외부로 이동할 수 있도록 하여 해결할 수 있다.



[그림 6] 항적 이탈 예

수상함 표적의 항적 경계는 그림 7과 같이 표적의 진행 방향과 거의 근사하게 된다. 어뢰는 효과적으로 표적에 접근하기 위해 어뢰가 지나온 항적 경계점의 정보를 저장하고, 저장된 정보를 통해 표적 진행 방향을 추정한다. 그림 7과 같이 항적 경계면  $b_1$ ,  $b_2$ 를 이용하여 추정된 표적 진행 방향은( $d_{tar}$ ) 실제 표적의 진행 방향과 근접한 값을 가지게 된다. 그림 7은 단측 모드에서 표적의 진행 방향을 추정하고 항적을 탐색하는 방법이다. 그림 7에서  $\theta$ 는 추정된 표적의 진행 방향과( $d_{tar}$ ) 현재 어뢰 진행 방향( $d_{cur}$ )과의 차이이다. 어뢰는 기준각  $\theta_{th}$ 에 따라 각속도를 변경하여 표적에 접근한다. 즉,  $\theta > \theta_{th}$ 이면 최대 각속도로,  $\theta < \theta_{th}$ 이면 설정된 각속도로 회전하며 탐색 운동을 한다.



[그림 7] 단측 모드 탐색

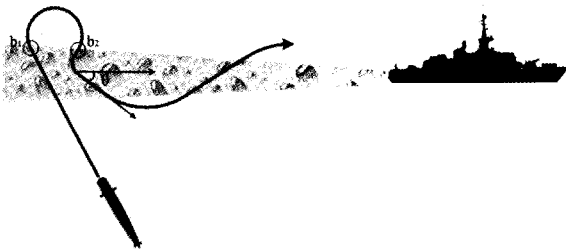
다. 양측 모드 탐색

양측 모드의 전체적인 흐름은 단측 모드와 유사하다. 항적 외부에서는 단측 모드와 같이 항적 재진입을 위한 곡선 운동을 하고, 항적 내부에서는 직진 운동을 한다. 양측 모드 탐색 방법은 단측 모드에 비해 표적의 회피 기동에 의해 생긴 곡선 형태의 항적에 약점을 가진다. 그러므로 회피 기동에 강인하기 위해서는 단측 모드에 비해 복잡한 구조를 갖게 된다.

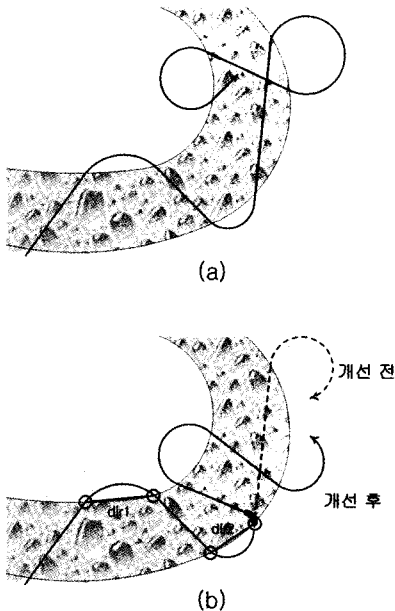
단측 모드와 동일하게 양측 모드에서도 항적 경계 지점 정보를 통해 추정된 표적 진행 방향과 어뢰의 현재 진행 방향에 따라 어뢰 운동을 다르게 하여 표적에 접근한다. 그림 8은 양측 모드에서 표적의 진행 방향을 추정하고 항적을 탐색하는 방법이다.  $\theta > \theta_{th}$  일 경우 최대 각속도로 회전하고,  $\theta < \theta_{th}$ 인 경우 기본적인 양측 모드의 회전 운동을 한다.

그림 9에서 (a)는 표적의 회피 기동에 의해 생성된 곡선 항적으로 인해 양측 모드 탐색 방법에서 발생할 수 있는 문제를 나타낸 것이다. 어뢰가 항적 외부로 나갈 때 입사했던 경계를 뚫고 나가게 되면 회전 방

향의 변경으로 인해 표적 진행 방향의 반대 방향으로 회전 운동을 하는 경우가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 그림 9 (b)와 같은 방법을 제안하였다. 어뢰는 항적 외부로 나온 후 다시 항적 내부로 들어갈 때 마다 어뢰가 지나온 두 항적 경계 지점을 통해 추정된 표적 진행 방향을 갱신한다. 갱신된 정보(dir2)와 이전 정보(dir1)가 일정각  $\theta_{ma}$  이상 차이가 나면 어뢰는 표적이 회피 기동을 하고 있다고 판단하여, 항적 내부로 들어간 후에도 일정 시간  $t$ 초 동안 회전 운동을 하여 반대편 항적 경계면을 통과해 나갈 수 있도록 한다. 또한, 회피 기동을 인지하지 못하여 문제가 발생할 경우, 어뢰가 표적 진행 방향의 반대 방향으로 회전하면 항적으로 재진입하기까지 어뢰의 누적 회전 각도가 증가하는 점을 이용하여 해결한다. 즉,



[그림 8] 양측 모드 탐색



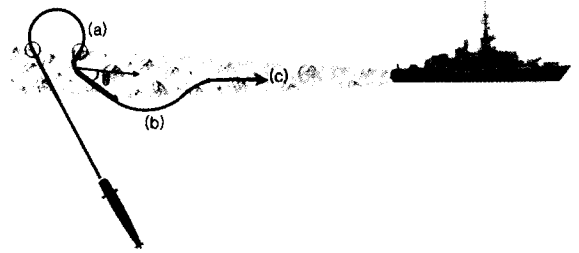
[그림 9] 양측 모드 문제 및 해결책

어뢰가 일정각  $\theta_{turn}$  이상 회전을 하게 되면 다음 회전 운동 시 회전 방향을 한 번 더 유지시켜 어뢰가 표적 진행 방향으로 회전할 수 있도록 하였다.

### 라. 중앙 모드 탐색

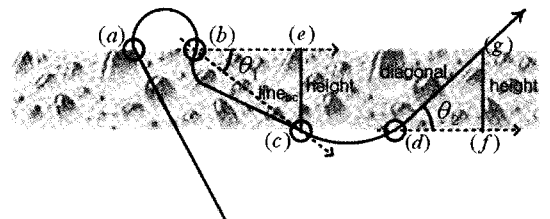
중앙 모드는 양측 모드 탐색과 같은 방법으로 항적 내부와 외부를 두 번 넘나들며 항적에 대한 정보를 얻는다. 이후 항적 내부의 중심에서 표적을 향해 직진 운동을 한다. 양측 모드와 마찬가지로 중앙 모드 탐색 방법도 곡선 형태의 항적에 약점을 가지고 있으며, 표적의 회피 기동에 강인할 수 있도록 알고리즘이 설계되어야 한다.

그림 10은 중앙 모드에서 표적의 진행 방향을 추정하고 항적을 탐색하는 방법이다. 표적을 향해 직진 주 행하는 그림 10의 (c)운동에 이르기 전까지  $\theta > \theta_{th}$  일 경우 최대 각속도로 회전하고,  $\theta < \theta_{th}$  인 경우 기본적인 양측 모드와 같은 탐색 운동을 한다.



[그림 10] 중앙 모드 탐색

중앙 모드에서는 그림 10의 (a), (b) 운동을 통해 그림 11과 같은 방법으로 항적의 폭을 계산할 수 있다. 여기서, 항적 폭의 변화는 급격히 변화하지 않으므로 항적 폭을 계산할 시점에서 항적 형태는 그림 11과 같이 평행한 항적으로 가정한다. 어뢰가 지나온 항적 경계 지점(그림 11의 (b), (c), (d), (g))의 기하학적 구조를 이용하여 식 (4)와 같이 항적의 높이를 구한다.



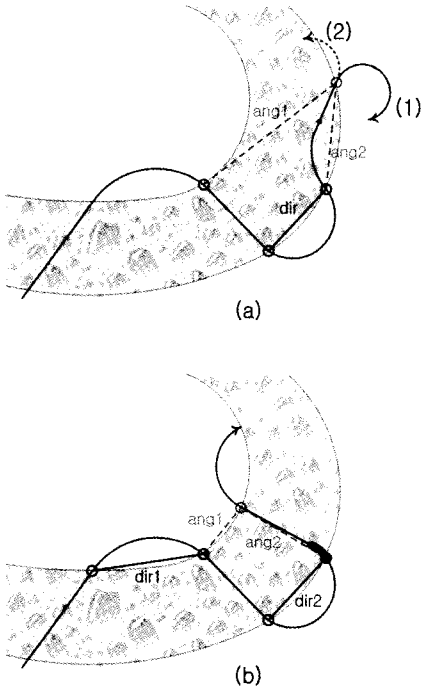
[그림 11] 항적 폭 계산

$$height = line_{bc} \times \sin\theta_1 \quad (4)$$

여기서  $line_{bc}$ 는 항적 경계점 (b)와 (c) 사이의 거리이고,  $\theta_1$ 는 (b)와 (c) 지점을 연결한 선과 추정된 표적 진행 방향이 이루는 각이다. (d)지점에 도달한 어뢰는 항적의 중앙까지 이동하게 되는데 어뢰가 이동해야 할 거리는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$diagonal = \frac{height}{2\sin\theta_2} \quad (5)$$

여기서  $\theta_2$ 는 (d)지점에서 어뢰의 진행 방향과 추정된 표적 진행 방향이 이루는 각도이다.

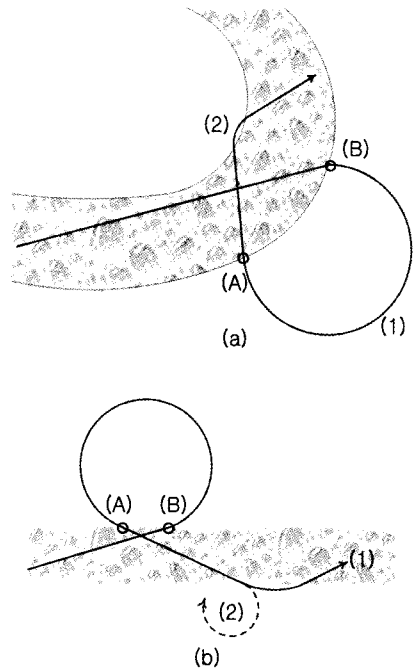


[그림 12] 표적 회피기동에 따른 중앙 모드 탐색의 문제 1 및 해결

중앙 모드 탐색 방법에서는 그림 12 (a)와 같이 직진 운동 중 항적 소실 시 항적 재진입을 위한 방향 결정에 대한 문제가 발생한다. 그림 12 (a)에서 (2) 방향으로 회전해야 올바른 회전이 되나, 판단의 기준이 되는 dir 각이  $ang2$  보다 유사하여 어뢰는 위쪽 항적 면을 통과했다고 판단해 (1) 방향으로 회전하

게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 그림 12 (b)와 같은 방법을 사용한다. 어뢰는 항적 외부로 나온 후 다시 항적 내부로 들어갈 때 마다 어뢰가 지나온 두 항적 경계 지점을 통해 추정된 표적 진행 방향을 갱신한다. 갱신된 정보(dir2)와 이전 정보(dir1)가 일정각  $\theta_{ma}$  이상 차이가 나면 어뢰는 표적이 회피 기동을 하고 있다고 판단, 항적 내부로 들어간 후 일정 시간 더 회전 운동을 한 뒤 직진 운동을 하여 반대편 항적 경계면을 통과해 나갈 수 있도록 한다. 이것은 재탐색 회전 방향의 오류를 줄여줄 수 있다.

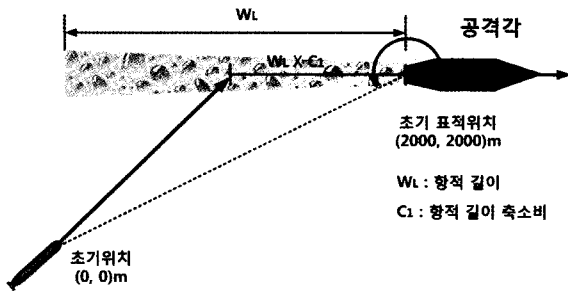
또한, 곡선 항적으로 인해 그림 13과 같은 항적 재탐색 방향이 잘못되는 문제가 발생된다. 어뢰가 (B)지점에서 이탈하여 (A)지점으로 항적에 재진입하는 항적 재탐색 과정에서 일정각 이상 회전하게 되면 재탐색 운동 방향이 잘못되었다고 판단한다. 이 경우 표적 진행 방향 추정을 위해 항적 경계면 위치 순서를 교환하고((B)지점을 (A)지점보다 최근 항적 경계로 인식) 이후 항적 외부에서 이전 방향(그림 13 (a)의 (1) 방향)과 같은 방향으로 한 번 더 회전한다(그림 13 (a)의 (2)). 그림 13 (b)와 같은 표적 추정 진행 방향 오류로 인한 문제도 동일한 방법으로 해결 가능하다.



[그림 13] 표적 회피 기동에 따른 중앙 모드 탐색의 문제 2

#### 4. 모의 실험

본 장에서는 임의의 환경 내에서의 모의 실험을 통해 본 논문에서 제시한 항적 탐색 성능 방법들의 성능을 실험적으로 고찰한다. 어뢰의 초기 위치는 (0m, 0m)이고, 수상함 표적은 초기 위치(2000m, 2000m)에서  $\alpha^\circ$ 의 공격각에 따라 움직인다. 그림 14는 공격각이 225°인 방향으로 표적이 운동하는 예이다. 어뢰 및 표적의 기본적인 세부 파라미터 항목은 표 1과 같다.



[그림 14] 모의 시나리오(공격각 225°일 때)

[표 1] 기본 파라미터

변수명	변수값
어뢰 속도	35knot
항적 접촉 최대 가능 거리	4500m
항적이 퍼지는 각도	2°
배터리 수명 / 최대 항주거리	15분 / 30km
탐색 형태	단측/양측/중앙 탐색
선회 각속도	8°/sec, 20°/sec
재탐색시 어뢰 속도 / 어뢰 선회 반경	40knot / 8°
표적 속도	25knot
표적 체원(길이×폭×높이)	100×20×5m
표적 속도 오차	5 knot
공격각 오차	5°

Monte-Carlo 실험을 통해서 어뢰의 탐색 성공률, 평균 탐색 시간을 구하여 이 값을 통해 어뢰의 성능을 측정하였다. 식 (6)의  $success(i)$ 는 탐색 성공 여부로서 어뢰가 표적 근방 100m 이내로 접근한 경우 탐색 성공으로 간주되어 그 값이 1이 되며, 실패할 경우는

0이 된다. 식 (7)의  $success_{time}(i)$ 는 탐색 성공까지 걸린 시간을 의미한다. 두 식에서  $m$ 은 Monte-Carlo 실험 회수를 의미하며, 본 실험에서는 100회의 반복 실험을 통해 성능 지수를 계산하였다.

$$\text{탐색 성공률}(P_s) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m success(i) \times 100 \quad (6)$$

$$\text{평균 탐색 시간}(t_a) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m success_{time}(i) \times 100 \quad (7)$$

가. 표적이 회피 기동을 하지 않을 경우

표 2는 표적이 회피 기동 하지 않을 때, 단측 모드, 양측 모드, 중앙 모드 탐색 방법의 탐색 성공률과 평균 탐색 시간을 각각 나타낸 것이다. 입수 거리는 표적과 표적 후면의 어뢰 목표 항적 입수 지점과의 거리를 의미하며, 항적 축소비에 의해 결정된다. 예를 들어 항적 접촉 가능 거리가 4500m이고, 항적 축소비가 1/5 일 경우, 입수 거리는 900m가 된다.

입수 거리가 길 경우, 공격각이 작은 상황에서는 성능이 저하되는 경향을 보이고 있다. 그러나 공격각이 180°에 가까워질수록 입수 거리를 길게 하여 초기 발사각을 설정하는 것이 성능 향상을 기대할 수 있었다. 공격각이 작아질수록 표적은 어뢰와 근접하는 방향으로 이동하게 된다. 그런데, 입수 거리를 길게 설정할 경우 항적에 들어가지 못하거나 항적 탐색 시간이 길어져 성공률이 낮아지게 된다. 그러나 공격각이 180°에 가까워지면 표적은 어뢰의 초기 위치에서 멀어지는 방향으로 이동하며, 이 경우 입수 거리를 짧게 설정할 경우 어뢰는 항적 접촉 시점이 늦어지게 되며 추정된 표적 방향, 표적 속도의 오차 요소들의 영향을 받는 시간이 길어지게 된다. 이것은 항적 발사각의 불안정성을 증가시키는 요소가 된다. 그러므로 입수 거리를 길게 설정함으로써 항적 접촉 시점을 앞당길 수 있으며, 항적이 접촉한 이후는 안정적인 항적 탐색 운동을 통해 표적에 접근하게 된다. 즉, 공격각에 따라 입수 거리를 유동적으로 설정하게 된다며 효과적인 탐색 성능을 얻을 수 있다.

그림 15는 각 탐색 모드에서 공격각에 따라 가장 탐색 성공률이 높은 입수 거리에서의 성공률을 나타낸 것이다(표 2의 어두운 부분). 표적이 회피 기동을 하지 않는 경우 모든 공격각에서 제안한 탐색 방법의 성공률이 비슷한 것을 확인할 수 있다.

[표 2] 비회피 기동시 입수거리/공격각에 따른 성능 비교

(a) 단측 모드

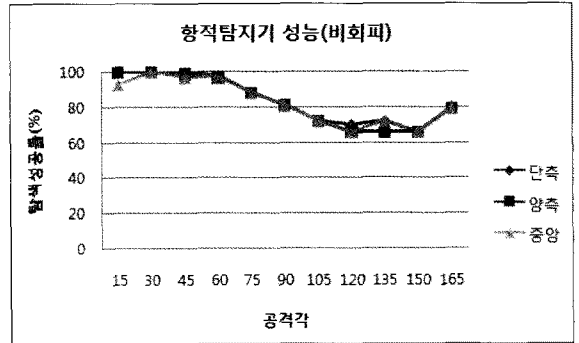
공격각		15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
입수거리												
4500	P <sub>S</sub>	0	0	0	1	11	41	48	70	72	66	80
	t <sub>a</sub>	-	-	-	748	624	635	620	591	580	592	576
1500	P <sub>S</sub>	100	100	99	98	88	81	72	66	66	66	57
	t <sub>a</sub>	708	705	633	507	447	402	407	420	484	519	541
900	P <sub>S</sub>	100	98	99	97	88	81	63	63	58	57	66
	t <sub>a</sub>	534	509	446	378	330	323	361	416	470	511	543
450	P <sub>S</sub>	67	88	87	89	67	63	55	56	62	51	51
	t <sub>a</sub>	446	421	370	309	276	303	343	399	458	505	540
300	P <sub>S</sub>	49	76	85	70	74	64	51	48	59	51	53
	t <sub>a</sub>	387	380	345	305	255	285	343	399	461	509	541

(a) 양측 모드

공격각		15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
입수거리												
4500	P <sub>S</sub>	0	0	0	0	5	25	35	59	64	63	79
	t <sub>a</sub>	-	-	-	-	425	594	613	622	624	637	603
1500	P <sub>S</sub>	0	46	78	96	85	81	72	66	66	66	57
	t <sub>a</sub>	-	812	741	589	494	446	443	446	506	539	549
900	P <sub>S</sub>	92	100	99	97	88	81	63	63	58	57	66
	t <sub>a</sub>	705	586	498	410	353	348	382	443	495	531	552
450	P <sub>S</sub>	100	100	88	89	67	63	55	56	62	51	51
	t <sub>a</sub>	429	350	298	277	282	322	361	420	477	521	545
300	P <sub>S</sub>	99	95	86	70	74	64	51	48	59	51	53
	t <sub>a</sub>	353	299	247	251	251	298	363	416	469	524	548

(a) 중앙 모드

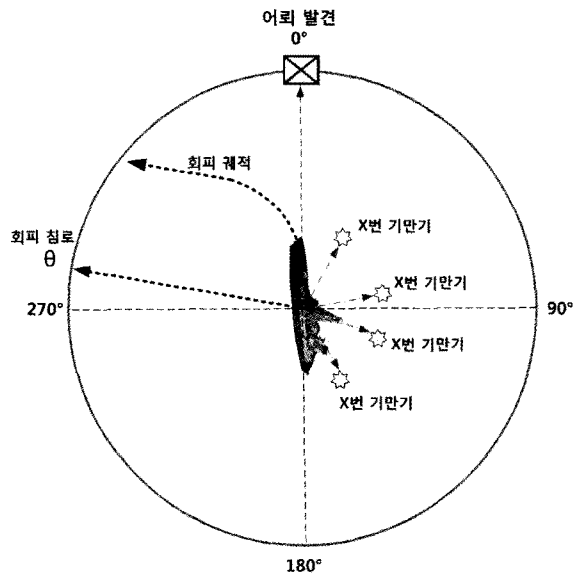
공격각		15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
입수거리												
4500	P <sub>S</sub>	0	0	0	0	6	34	41	65	72	60	79
	t <sub>a</sub>	-	-	-	-	446	630	603	602	601	585	581
1500	P <sub>S</sub>	9	55	82	94	87	81	72	66	66	66	57
	t <sub>a</sub>	875	792	693	538	481	424	425	438	482	533	549
900	P <sub>S</sub>	93	92	97	97	88	81	63	63	57	56	66
	t <sub>a</sub>	674	568	464	398	338	346	393	436	481	527	544
450	P <sub>S</sub>	88	100	88	89	67	63	55	56	62	50	51
	t <sub>a</sub>	501	375	298	294	286	329	349	418	471	523	549
300	P <sub>S</sub>	90	95	86	70	74	64	51	48	59	49	53
	t <sub>a</sub>	434	311	255	253	251	302	376	410	457	513	546



[그림 15] 탐색 방법에 따른 항적 추적 어뢰 성능(비회피 기동 일 때)

나. 표적이 회피 기동을 할 경우

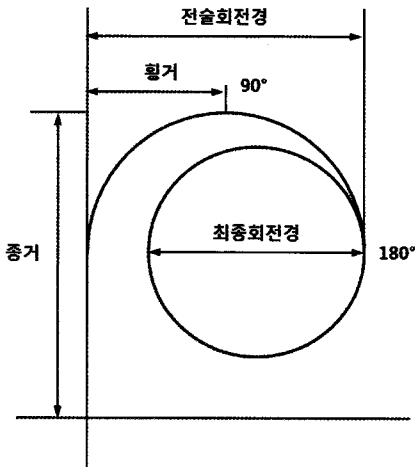
본 실험에서는 어뢰가 경보 거리 내에 들어오게 되면 표적은 회피 및 음향 대항 수단을 사용한다고 가정하였다. 회피 기동 및 음향 대항 수단은 어뢰의 탐지 가능 영역에서 벗어나기 위해 어뢰와의 상대거리를 최대화하는 것이 목적이므로 함정의 속도를 높이고 어뢰로부터 최대 회피가 가능한 방위를 결정해 침로를 변경한다<sup>7-9)</sup>. 그림 16과 같이 어뢰가 경보 거리 내에 들어오게 되면 침로를 변경함과 동시에 부유식 기만기 4기를 발사한다고 가정하였다. 회피 침로와 기만기 투하 방위는 어뢰 접촉 방위에 따라 정해진다.



[그림 16] 수상함 표적의 회피 침로 및 기만기 투하



그림 16의 회피 기동 궤적을 살펴보면 수상함이 침로를 변경할 때 관성 때문에 즉시 방향을 바꾸지 못하고 먼저 일정한 거리를 미끄러지듯 직진하게 되는데 이렇게 함정의 침로 변경 시의 궤적은 관성에 의해 미끄러지는 직진 구간과 실제로 변침이 시작되는 곡선 구간으로 나눌 수 있다. 그림 17에 나타난 것처럼 함정이 조타한 이후 침로가 90° 변경될 때까지 원침로 방향으로 진행한 거리를 ‘중거’라고 하며, 원침로에 수직한 방향으로 진행한 거리를 ‘횡거’라고 한다. 또한 침로가 처음과 180° 바뀔 때까지 선회한 반원 궤적의 지름을 ‘전술 회전경’이라 하고 180° 이후에는 그리는 완전한 원 궤적의 지름을 ‘최종 회전경’이라고 한다. 중거, 횡거, 전술 회전경 및 최종 회전경은 함정의 종류, 속도 및 조타각에 따라 달라진다. 이러한 운동 특성을 반영하여 함정이 회피 기동할 때 먼저 중거의 1/2 거리만큼 직진한 후 선회가 시작 되도록 한다. 또한 회피 기동 시 침로를 180° 이상 변경하는 경우는 없으므로 선회 반경은 전술 회전경을 사용하여 침로 변경 시의 원 궤적을 모델링한다.



[그림 17] 변침시의 진행 경로

표 3은 표적이 회피 기동 할 때, 단측 모드, 양측 모드, 중앙 모드 탐색 방법의 탐색성공률과 평균탐색 시간을 각각 나타낸 것이다. 가장 눈에 띄는 것은 입수 거리가 짧을 때, 공격각이 0°에 가까운 경우에 높은 탐색성공률을 보이나 공격각이 180°에 가까워질수록 현저하게 탐색성공률이 떨어지는 것이다. 그 이유는 입수 거리가 짧으면 예상 요격 지점에서 가까운 지점으로 어뢰가 발사되어 움직이게 되는데, 표적이

[표 3] 회피 기동시 입수거리/공격각에 따른 성능 비교

(a) 단측 모드

공격각	입수거리	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
4500	P <sub>s</sub>	0	0	0	1	5	33	40	54	53	51	56
	t <sub>a</sub>	-	-	-	794	770	737	663	663	632	621	596
1500	P <sub>s</sub>	99	98	100	95	86	41	26	13	18	23	21
	t <sub>a</sub>	723	741	662	532	481	539	531	528	552	564	579
900	P <sub>s</sub>	100	81	94	91	71	17	7	8	11	13	25
	t <sub>a</sub>	548	534	445	388	385	488	547	532	542	565	80
450	P <sub>s</sub>	100	89	89	70	42	5	3	3	4	6	10
	t <sub>a</sub>	399	323	304	320	348	456	484	498	534	566	586
300	P <sub>s</sub>	100	94	89	48	40	2	6	3	3	11	18
	t <sub>a</sub>	340	292	282	313	324	440	478	526	543	556	581

(a) 양측 모드

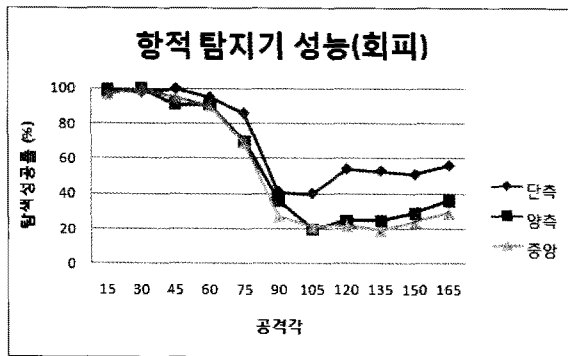
공격각	입수거리	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
4500	P <sub>s</sub>	0	0	0	0	1	6	20	25	25	29	36
	t <sub>a</sub>	-	-	-	-	899	749	715	736	781	755	716
1500	P <sub>s</sub>	0	1	22	59	70	36	19	11	16	15	12
	t <sub>a</sub>	-	856	788	607	532	669	641	670	705	741	675
900	P <sub>s</sub>	19	75	89	91	67	16	6	5	9	9	14
	t <sub>a</sub>	776	703	552	455	410	631	685	684	661	698	680
450	P <sub>s</sub>	94	100	91	71	42	3	3	2	2	5	6
	t <sub>a</sub>	499	391	342	350	371	556	561	840	717	789	646
300	P <sub>s</sub>	99	100	90	49	40	1	3	2	2	6	7
	t <sub>a</sub>	397	339	305	335	335	507	583	716	760	749	641

(a) 중앙 모드

공격각	입수거리	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
4500	P <sub>s</sub>	0	0	0	0	1	10	21	22	19	24	29
	t <sub>a</sub>	-	-	-	-	889	734	676	667	738	746	772
1500	P <sub>s</sub>	2	21	67	90	68	27	20	11	16	15	11
	t <sub>a</sub>	897	807	788	657	521	593	649	646	647	671	745
900	P <sub>s</sub>	63	92	95	90	69	15	6	5	9	9	15
	t <sub>a</sub>	768	662	584	474	414	610	660	628	649	677	745
450	P <sub>s</sub>	90	100	91	70	42	3	3	1	2	5	5
	t <sub>a</sub>	511	435	631	640	690	539	618	900	735	696	725
300	P <sub>s</sub>	97	100	90	49	40	1	3	2	1	5	7
	t <sub>a</sub>	403	383	301	335	329	577	614	661	632	676	683

회피 기동을 하게 되면 그 위치에 항적이 존재하지 않기 때문이다. 그러므로 표적이 회피 기동을 하기 전에 항적으로 들어갈 수 있도록 입수 거리를 길게 설정하는 것이 보다 안정적인 성능을 가져다준다. 그러나 공격각이 0°에 가까울 경우 표적은 어뢰의 초기 위치를 향해 이동하기 때문에 표적이 회피 기동을 해도 어뢰가 회피한 표적의 항적에 접촉할 수 있게 된다. 이로 인해 입수 거리가 짧아도 안정된 탐색성공률 보인다.

그림 18은 각 탐색 모드에서 공격각에 따라 가장 탐색성공률이 높은 입수 거리에서의 성공률을 나타낸 것이다. 공격각이 0°에 가까울 때는 세 가지 탐색 방법이 비슷한 성공률은 보이나 공격각이 180°에 가까워질수록 단측 모드가 다른 탐색 방법에 비해 더 좋은 탐색성공률을 보인다. 그 이유는 양측 모드나 중앙 모드의 경우 표적의 회피 기동에 의해 항적 이탈, 표적 진행 방향 추정 오류, 탐색 시간 지연 등의 문제점들이 빈번히 발생하지만, 단측 모드는 표적의 회피 기동에 따른 문제점들이 양측, 중앙 모드 방법에 비해 작게 발생하므로 가장 안정적으로 탐색 운동을 하게 된다.



[그림 18] 탐색 방법에 따른 항적 추적 어뢰 성능(회피 기동 일 때)

### 5. 결론

본 논문에서는 회피 기동에 강인한 항적 어뢰의 탐색 방법을 연구하였다. 초기 항적 발사각은 표적, 항적, 어뢰의 기하학적 위치와 표적 정보를 적용하여 유도하였으며, 어뢰의 항적 탐색 운동 모델은 단측, 양

측, 중앙 모드 방법을 제시하였다. 항적 발사각 계산 시 공격각에 따라 입수 거리를 변동하는 것이 성능 향상을 위해 필요함을 모의 실험을 통해 알 수 있었다. 또한 제안한 탐색 모드 중에서 단측 모드 탐색 방법이 탐색 구조 및 성능 측면에서 가장 효율적임을 알 수 있었다.

### Reference

- [1] Norman Friedman, "Start Worrying about Wake Homing Torpedoes", Preceeding, Naval Institute, pp. 123~124, Sep. 1994.
- [2] 이영현, 구분화, 홍우영, 정남식, 한봉완, 정석문, 임보택, 김우식, 고한석, "항적 탐지 어뢰의 효과도 분석", 제22회 수중음향학 학술발표회 논문집, Aug, 2007.
- [3] H. Medwin, "In Situ Acoustic Measurements of Bubble Populations in Coastal Ocean Waters", Journal of Geophysical Research, Vol. 75 No. 3, pp. 599~611, Jan. 1970.
- [4] H. Medwin, "In Situ Acoustic Measurements of Microbubbles at Sea", Journal of Geophysical Research, Vol. 82 No. 6, pp. 971~976, Feb. 1977.
- [5] E. W. Miner and O. M. Griffin, "Bubble Motions in Sea Water", Ocean Physics and Engineering, Vol. 12 No. 1, pp. 25~46, 1987.
- [6] J. B. Conant, The Physics of Sound in the Sea, Summary Technical Report of Div. 6, NDRC, Vol. 8, 1946.
- [7] 최성환, 송광섭, 허성필, 이상용, 김연선, 이형욱, "함정 회피 확률 분포의 최적화 기법 연구", 국방과학연구소, NWS-417-950227, 1995.
- [8] 최성환, 허성필, 정석문, 신성철, "어뢰 대항 전술 개발을 위한 알고리즘 연구 (I)", 국방과학연구소, NWS-413-990150, 1999.
- [9] 허성필, "몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 유도어뢰 회피전술 체계의 효과도 분석", 한국경영과학회 학술대회 논문집, No. 1, 1997.
- [10] 윤현규, "어뢰 탐지 효과도 분석 기법 연구", 국방과학연구소, NWS-519-960331, 1996.