

Effectiveness analysis of a hard-kill underwater defense system for surface warships against wake-homing torpedo attack

Shin, Myoungin* · Hong, Wooyoung** · Lee, Jinho***

ABSTRACT

We conducted simulations to analyze the effects of a hard-kill-type underwater defense system that defends friendly warships against an enemy wake-homing torpedo. Assuming that the enemy torpedo is a wake-homing torpedo, our surface warship detours to the prespecified evasive course by firing a hard-kill-type system, which is modeled as a passive acoustic homing-torpedo, to attack the enemy torpedo. We analyzed the effectiveness of a warship's survival probability via Monte Carlo simulation, given the probabilistic angles of the launched torpedoes, to compare two cases where one used only evasive maneuvering and the other used the hard-kill-type underwater defense system with evasion at the same time. By changing the maximum torpedo detection range of a warship and the torpedo's initial location, we observed that the resulting survival probability of a warship was above 61% with a hard-kill-type defense system, whereas it remained at 34% without a hard-kill defense system, the necessity of a hard-kill underwater defense system, especially against wake-homing torpedoes.

Keywords : wake-homing torpedo, hard-kill type underwater defense system, simulation, effectiveness analysis

* (First Author) Agency for Defense Development, Senior Researcher, myoungin@add.re.kr, <https://orcid.org/0000-0003-3456-8123>.

** (Co-Author) Department of Defense Systems Engineering, Sejong University, Professor, wyhong@sejong.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-9022-8425>.

*** (Corresponding Author) Department of Defense Management, Korea Naval Academy, Professor, jhlee@navy.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0003-4192-3912>.

I. 서론

어뢰처럼 소형, 경량이면서 고속으로 접근해오는 표적에 대한 효과적인 대응은 과학기술의 발달에도 여전히 어려운 문제이다. 어뢰는 유도 방식¹⁾에 따라 분류하면, 목표 함정을 향해 일직선으로 운동하여 표적을 공격하는 직주어뢰, 잠수함과 어뢰가 선으로 연결되어 표적까지 어뢰를 유도하는 선유도어뢰, 표적에서 발생하는 소음을 탐지해 추적하는 수동음향 탐지어뢰, 어뢰에서 직접 음파를 방사하여 발생하는 반사파를 이용해 표적을 탐지하는 능동음향 탐지어뢰, 그리고 수상함이 기동 시 발생시키는 항적 속의 미세기포를 탐지해 표적을 추적하는 항적추적어뢰, 어뢰의 진행방향 앞쪽을 진공상태로 만들어 초고속으로 움직일 수 있는 초공동어뢰 등으로 분류할 수 있다(Freidman, 1994; Ha, Cha, Lee, 2010; Kim, 2014; Shin et al., 2016).

어뢰의 기술 발전에 따라 대응 방어책도 함께 발전하면서 수중방어체계는 크게 소프트킬(Soft-kill) 방식과 하드킬(Hard-kill) 방식으로 구분할 수 있다. 소프트킬 방식의 수중방어체계는 기만기, 재머(Jammer) 및 함정이 회피하기 위한 기동 등이 해당한다. 예를 들어 기만기는 부유식과 자항식이 대표적이다(Shin et al., 2016). 반면 어뢰가 다양한 형태로 발전함에 따라 소프트킬 방식만으로 대응에 한계가 있어 더 적극적인 대응이 요구된다. 그래서 현재 전 세계적으로 적 어뢰를 직접 타격하거나 주위에서 자폭함으로써 무력화하는 하드킬 방식의 수중방어체계(George, Joseph, & Santhanakrishnan, 2019) 개발이 활발히 진행되고 있다. 이런 추세에 원인은 항적추적어뢰의 경우 음향의 기만에 반응하지 않으며, 오직 표적에서 발생시키는 항적만을 추적하므로 기존 음향 기만 방식의 수중방어체계로 회피가 불가능한 상황에 있다. 대표적인 하드킬 방식으로 적 어뢰 근접 시 자폭하는 UDAV-1, Waiting(러시아), Homing 개념을 동시에 적용한 Torbuster(이스라엘), 직접 적 어뢰를 타격하여 무력화하는 MU-90(유럽), ADC MK 3/4(미국), Sea Spider(독일) 등이 있다(이동수, 변유진, 박수현, 2014).

이런 어뢰의 발전은 그 방어체계에 대한 경쟁적 발전뿐만 아니라 운용적 측면의 연구도 활발히 진행되면서 방어체계의 효과분석을 위해 M&S(Modeling and Simulation) 기법이 널리 적용되고 있다. 예를 들어, 소프트킬 방식의 방어체계 관련하여 수상함, 어뢰, 잠수함 및 기만기의 성능에 영향을 미치는 변수를 고려한 생존성 측정(Seo et al., 2011), 부유식·자항식 기만기의 효과적 운용(Hong & Kim, 2010), 기만기와 재머의 혼합 운용(Kwon et al., 2012; Zhan, Yu, & Wang, 2011) 등의 연구가 진행되었다. 최근에는 Cho & Kim(2021)이 하드킬 방식 방어체계 사용 시 최종 교전단

1) 유도 방식에 따른 어뢰의 분류

종류	직주형	선유도	수동음향	능동음향	항적추적
유도 개념	유도장치 無	선으로 연결하여 표적까지 유도	기관, 스크루 등 소음 추적	어뢰에서 음파 방사 후 반사파 추적 타격	표적이 항해한 항적을 추적

(출처) 이동수, 변유진, 박수현(2014). 어뢰 및 어뢰대항책의 발전 추세와 시사점. 한국국방연구원 주간국방논단, 1529, pp. 52-56.

계의 효과도를 분석하였다. 한편 기만기와 재머 등의 기만으로부터 자유로운 항적추적어뢰가 개발되면서 수상함의 발생시키는 항적을 효과적으로 탐색·추적하는 연구(Ku et al., 2009; Lee et al., 2010)가 진행되었다. 이후의 연구는 수상함의 항적을 생성하는 모델(Bae et al., 2021), UUV에 탑재된 다수의 항적추적어뢰의 발사거리, 속도, 표적의 기동침로 등에 따른 효과적인 발사 방법(Liang, Luo, Wang, & Hao, 2022) 등을 제시하였다.

대부분의 선행연구는 항적 자체의 생성 모델, 항적어뢰의 효과적 항적 추적 방법, 다수의 항적추적어뢰의 발사형태 등에 초점을 두고 공격 측면의 활용성을 다루고 있다. 그러나 항적추적어뢰가 우군 수상함을 공격했을 때 기존 음향기만 위주의 방어체계가 갖는 취약점의 극복방안을 제시하는 연구가 매우 제한적인 실정이다. 게다가 항적추적어뢰의 공격을 받을 때, 음향기만 위주의 방어는 더 이상 생존을 보장하지 못하므로 적 항적추적어뢰를 직접적으로 타격(하드킬)하여 위협에서 벗어나는 방어체계가 요구되고 있다. 결국, 항적추적어뢰는 음향에 영향을 받지 않고 수상함이 발생하는 항적을 쫓아 접근하므로 기만기에 의한 기만이 무의미하게 된다. 그래서 수상함은 오직 회피기동과 하드킬 방식의 수중방어체계에 의해서만 생존이 가능하다고 할 수 있다. 이에 본 연구는 항적추적어뢰에 대한 하드킬 방식의 수중방어체계가 수상함의 생존성에 미치는 영향을 시뮬레이션으로 그 효과를 분석하는 데 목적을 두고 있다. 또한, 본 연구는 시뮬레이션을 통해 하드킬 방식 방어체계의 효과가 어느 정도인지 측정하기 위해 동일한 상황에서 회피기동만 실시한 경우와 회피기동과 함께 하드킬 방어체계를 적용한 경우를 비교하고자 한다.

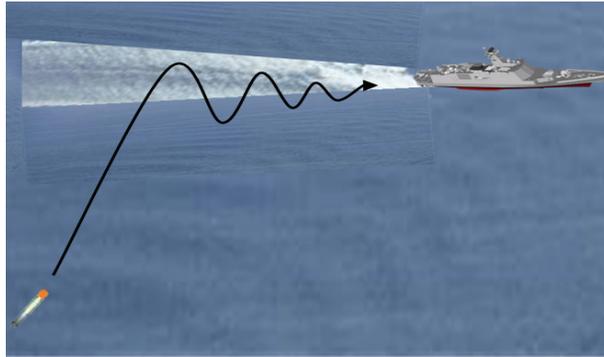
II. 모델 구성 및 변수 설정

실험을 구성하는 기본 모델은 적 공격어뢰(항적추적어뢰), 수상함 운동모델 그리고 하드킬 방식의 수중방어체제로 구성하며, 각 모델에 대한 구성 요소 및 변수는 다음과 같다.

2.1 공격어뢰 모델

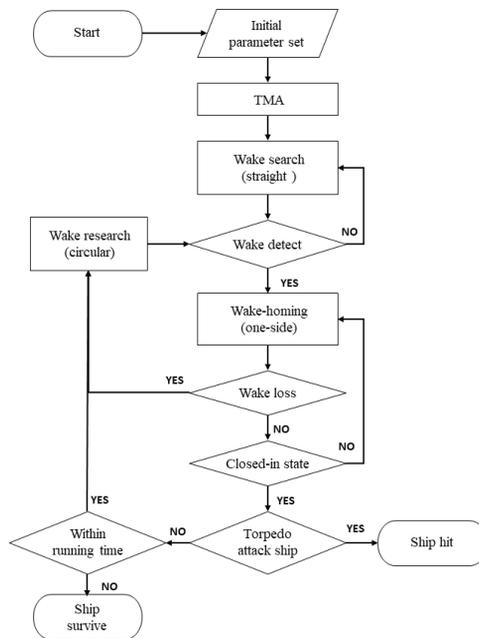
항적추적어뢰는 음향추적어뢰와 달리 항적이 존재하는 방향으로 발사되어야 한다. 따라서 발사각 설정은 수상함 표적의 진행 방향, 속도 및 수상함의 항적 길이를 고려하여 기하학적 구조를 통해 표적 후면에 생성되는 항적이 어뢰가 도달할 수 있어야 한다. Ku et al.(2009)가 제시한 표적기동분석(TMA : Target Motion Analysis)을 통해 항적추적어뢰의 발사각을 계산하여 발사하며, 표적 기동분석 시 표적의 실제위치와 표적 위치라고 판단된 위치 간에 오차가 존재할 수 있어 $\pm 3^\circ$ 이내에서 오차가 균등분포를 따르도록 가정하였다. 또한, 발사된 항적추적어뢰는 직진 운동을 시행하고 항적이 탐지될 시 항적탐색운동을 실시한다. 항적추적어뢰의 항적탐색방법은 항적의 한쪽 경

계면을 기준으로 항적을 탐색하는 단측탐색모드, 항적의 양쪽 경계면을 번갈아 가며 탐색하는 양측 탐색모드 그리고 항적 내부에 진입하여 탐색하는 중앙탐색모드가 있다. 본 연구는 Ku et al.(2009)의 시뮬레이션 결과를 참고하여 비교적 우수한 성능을 보여준 단측탐색모드를 항적추적어뢰의 탐색모드로 적용하였다.



<Figure 1> One-sided search mode of a wake-homing torpedo

Figure 1은 단측탐색모드의 운동모델이며, Figure 2는 항적추적어뢰의 운동모델 및 탐지모델의 모식도이다. 항적추적어뢰는 TMA를 통해 추정된 발사각으로 잠수함에서 발사한다고 가정하였으며, 최초 항적 탐지까지 직진 운동을 수행한다. 항적이 탐지되면, 항적 진입각에 따라 좌측 또는 우

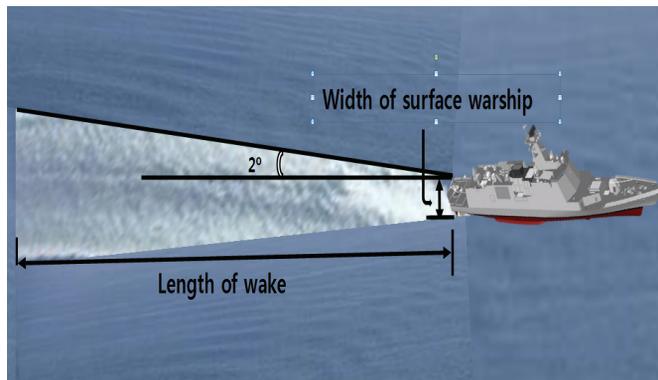


<Figure 2> Flow chart of a wake-homing torpedo's moving and detection models

측으로 항적을 탐지하기 시작하고, 항적의 한쪽 경계면을 따라 표적을 추적한다. 단측탐색 항적추적어뢰의 회전각속도는 00° 로 가정하였으며 항적 내부에 360° 회전을 한 경우 항적 내 무한 회전 탈출 로직을 적용하여 최대 각속도(00°)로 회전하여 항적내부에서 탈출하도록 모델링하였다. 이때 회전 방향은 항적 경계면의 정보를 통해 추정된 표적의 진행방향으로 수행한다.

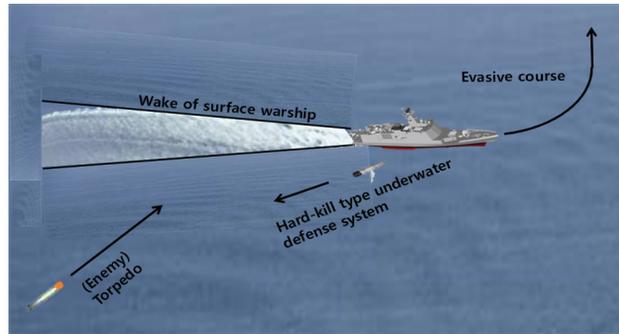
2.2 수상함 운동모델

본 연구에서 수상함은 대잠능력을 갖추고 있는 구축함을 기준으로 선정하였으며 최초 위치에서 000° 방향으로 25knots의 속력으로 이동한다고 가정하였다. 그리고 수상함의 항적은 수상함의 종류와 속도, 해상 상태에 따라 다르게 나타날 수 있으나, Ku et al.(2009)의 연구 결과를 적용하여 Figure 3과 같이 항적이 발생하는 것으로 설정하였다. 이때 수상함의 항적은 2° 간격으로 퍼지며, 항적 길이(Length of wake)는 수상함의 함미로부터 4,500m가 유지된다고 가정하였다.



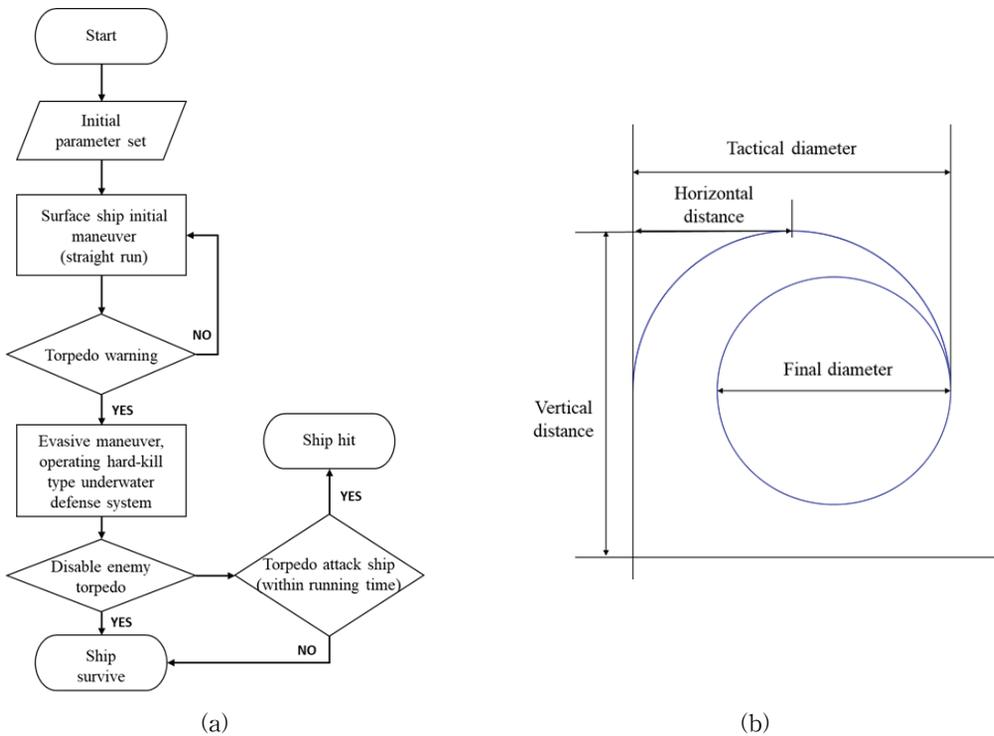
<Figure 3> Wake model of a surface warship

수상함의 수중방어체계는 회피기동과 하드킬 방식의 수중방어체계로 구성한다. 수상함은 어뢰음향대항체계(TACM)에서 적 어뢰 발견 시 즉각적으로 지정된 방위로 회피기동(Park et al., 2011)하며, 동시에 적 어뢰에 대한 표적기동분석을 실시한다. 회피기동 시행 00초 후에 표적기동분석에 따른 적 어뢰 추정방위로 수상함에서 하드킬 방식의 수중방어체계를 발사하는 것으로 설정하였다. 적 항적추적어뢰의 공격에 따른 수상함의 회피기동 및 하드킬 방어체계 발사를 개략적으로 나타내면 Figure 4와 같다.



<Figure 4> Surface warship underwater defense systems and anti-torpedo defense

Figure 5(a)는 수상함의 운동모델을 나타낸다. 추가로 기동 중인 수상함을 현실적으로 반영하기 위해 종거, 횡거, 전술 회전경 및 최종 회전경을 수상함 운동모델에 반영하였다(Figure 5(b), Park, 2008). 이러한 운동모델을 기반으로 수상함은 적 어뢰의 무력화 방식으로 회피기동과 회피기동과 하드킬 방식의 수중방어체계를 사용하는 경우로 구분하고, 수상함의 어뢰음향대항체계의 탐지능력 거리를 1,500m~2,750m까지 250m 간격으로 변경하며 수상함의 생존율을 계산하였다.



<Figure 5> Flow chart of a warship's moving model

본 연구의 항적추적어뢰, 수상함 및 하드킬 방어체계의 시뮬레이션 파라미터 설정값은 Table 1과 같다.

<Table 1> Summary of the simulation parameters

Parameters of a wake-homing torpedo	
Initial location	005°~355°, 2828m
Search/max speed	35 knots / 45 knots
Wake-search model	One-sided search mode
Operating duration	15 minutes
Launch angle error	±3°
Parameters of a warship	
Initial location	(0m,0m,0m)
Initial maneuvering course	000° (Maneuvering to the x-axis direction)
Speed	25 knots
Max torpedo alarm range	1500m~2750m (increase by 250 from 1500 to 2750)
Defense system	Evasive maneuvering only, Evasive maneuvering & Hard-kill defense system launch
Evasive course/speed	Evasive course determined by TACM(Park, 2008) / 25knots
Parameters of a hard-kill-type defense system	
Launch time	00 seconds after evasive maneuvering
Launch angle error	±9°
Search pattern	Snake search, Circle search
Sweep angle	±30°
Search/max speed	35knots / 45knots

2.3 하드킬 방식 수중방어체계 모델

본 연구에서 하드킬 방식의 수중방어체계는 수상함에서 직접적으로 어뢰를 발사하여 적 어뢰를 탐지/무력화시키는 방식으로 설정하였다. 수상함에서 발사하는 어뢰는 음향탐지어뢰로 설정하였다. 수상함은 어뢰음향대항체계가 적 어뢰 발견 시 즉각적으로 회피기동을 시행하고 동시에 표적기동분석을 통해 발사각 계산을 시작한다. 이때 발사각은 표적의 진행방향 및 수상함에서 발사하는 어뢰의 속도를 이용하여 예상 요격지점을 기하학적인 방법으로 계산하였으며 표적 기동분석 시 발생하는 오차를 확률적 요소로 고려하여 ±9° 이내에서 균등분포를 따르도록 설정하였다.

수상함에서 발사된 어뢰는 탐색단계, 공격단계, 최종공격단계의 순서로 운동하게 된다. 탐색단계는 일정한 빔폭 범위 내에서 좌우로 탐색하는 사형탐색 방법을 적용하였다. 탐색단계에서 적 어뢰 탐지 시 표적 탐지를 유지하면서 적 어뢰를 쫓아가는 공격단계로 넘어가게 되며 적 어뢰가 일정 범위 이내에 존재할 경우 최종 공격단계가 시작된다. 최종 공격단계에서는 어뢰의 속도가 증가하게 되며 적 어뢰와의 거리가 일정 범위 이내에 도달하게 되면 적 어뢰를 격추하거나 자폭하여 적 어뢰

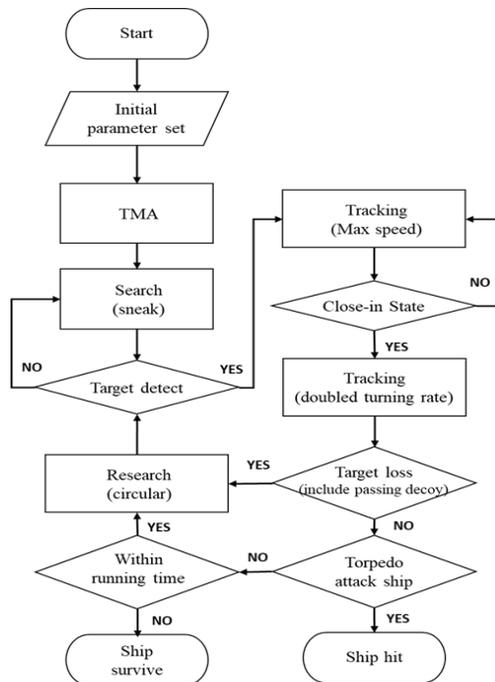
를 무력화한다. 만약 최종공격단계에서 공격 실패나 적 어뢰 탐지 실패 시에 재탐색 방법은 원형탐색을 적용하였다.

수상함에서 발사하는 어뢰의 표적 탐지 여부는 빔폭, 최대 탐지거리 및 신호이득(Signal Excess, SE)에 의해 결정되는데 빔폭, 최대 탐지거리, 신호이득은 고정된 값을 사용하였다. 수상함에서 발사한 어뢰가 탐색단계에서 적 어뢰를 탐색할 때 빔폭과 최대 탐지거리 내에 적 어뢰가 존재하면서 동시에 양의 신호이득(SE)을 가지게 되면 적 어뢰를 탐지하는 것으로 가정하며, 신호이득을 구하기 위해서는 수동소나방정식 (1)을 이용한다(Park, 2008).

$$SE = SL - TL - NL - DI - DT \tag{1}$$

Note. SE(Signal Excess) : 신호이득, SL(Source Level) : 표적에서 발생하는 소음의 크기를 의미하는 음원준위, TL(Transmission Loss) : 음파전달손실, NL(Noise Level) : 자연수중소음 및 어뢰 자체의 소음 등 음향신호를 탐지하는데 방해되는 소음의 준위, DI(Directivity Index) : 빔의 방향성을 나타내는 지향지수, DT(Detection Threshold) : 음향 신호의 탐지여부를 판단하는 탐지 임계치

본 연구에서는 수상함에서 발사한 어뢰가 적 어뢰 180°에 위치할 때의 거리와 최대탐지거리가 같을 때의 신호이득을 계산해 탐지 임계치로 설정하였다. Figure 6은 하드킬 수중방어체계의 운동 및 탐지모형을 알고리즘으로 구성한 시뮬레이션 절차이다.

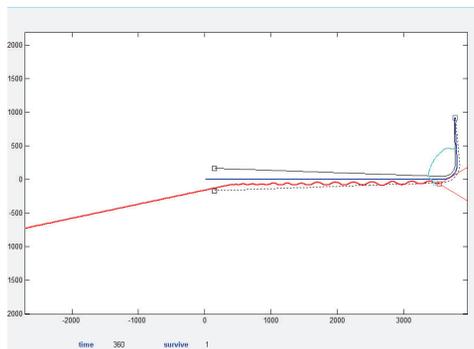


<Figure 6> Flow chart of a hard-kill-type underwater defense system

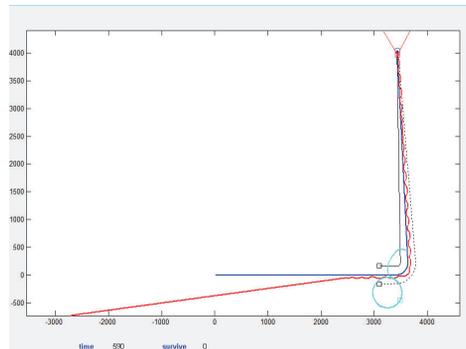
III. 시뮬레이션 실행 및 결과 분석

전체 시뮬레이션은 MATLAB(version R2018b) GUI를 이용하여 시행하였다. 처음 수상함은 (0m, 0m, 0m) 위치에서 000° 방위로 기동 중인 상태로 가정하며, 적 어뢰는 수상함 기준으로 005° ~ 355° (10도 단위)에서 수상함을 향해 발사되는 것으로 시나리오를 구성하였다. 적 어뢰 발사 시, 표적기동분석에 의해 발사각과 하드킬 방식의 음향탐지어뢰 발사 시의 발사각 계산에 각각 오차가 존재하므로 동일한 실험 환경하에서도 결과가 달라질 수 있어 몬테카를로 반복 시뮬레이션을 통해 평균적인 수상함의 생존율을 계산하였다. 또한, 시뮬레이션 시행은 이산 시간 단위로 시행하며, 적 어뢰, 수상함, 하드킬 방식의 수중방어체계에서 발사된 어뢰의 위치는 매초 단위로 업데이트되도록 설정하였다.

수상함은 최초 기동 방향으로 기동하다가 음향어뢰대항체계에서 적 어뢰 발견 시 회피기동을 시행하며, 하드킬 방식의 방어체계를 고려하여 수상함에서 적 어뢰를 격추하기 위한 어뢰를 발사한다. 실험은 수상함이 적 어뢰의 작동시간(15분) 동안 격추당하지 않거나 수상함에서 발사한 어뢰가 적 어뢰를 격추하여 무력화하면 수상함이 생존에 성공했다고 판단하였다. 각각 고정된 변수값 및 어뢰음향대항체계의 적 어뢰 탐지거리에 따라 동일한 시뮬레이션은 각각 500번 반복수행하여 수상함의 평균 생존율을 계산하였다. Figure 7의 (a)는 하드킬 방식의 수중방어체계에 의해 적 어뢰가 무력화되어 수상함이 생존한 경우의 예시이며, (b)는 하드킬 방식의 수중방어체계가 적 어뢰를 요격하는 데 실패하여 최종적으로 수상함이 생존하지 못한 경우의 한 예를 보여준다.



(a) Success case

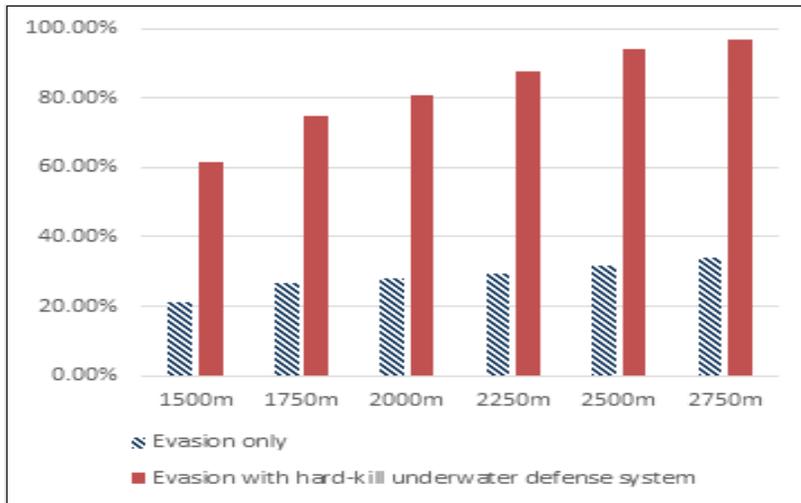


(b) Failure case

<Figure 7> Example success and failure cases with a hard-kill-type underwater defense system

이러한 방식을 사용하여 [수상함이 생존한 횟수/500회]×100%의 식으로 평균 생존율을 구하며, 회피기동만을 적용한 경우와 회피기동과 하드킬 방식의 방어체계를 동시에 적용한 생존율을 어뢰 음향대항체계의 적 어뢰 탐지거리에 따라 계산하여 그 결과값을 비교하였다(Figure 8). 분석결과, 수상함의 적 어뢰 탐지능력이 좋을수록 높은 생존율을 보였다. 이는 수상함의 탐지능력이 높을수록

적 어뢰를 조기에 탐지하여 회피기동을 시행하기 때문에 적 어뢰 자체가 수상함의 항적 내로 진입하지 못하는 경우가 증가하기 때문이다. 또한, 적 어뢰가 수상함 정면에서 진입하는 경우보다 수상함 후방에서 공격해 오는 경우에 비교적 더 높은 생존율을 보여주었다.



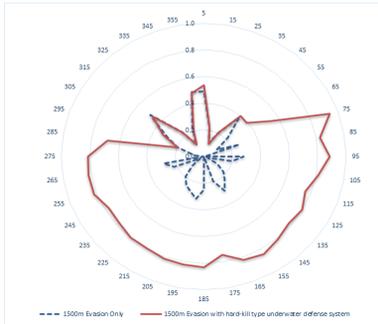
<Figure 8> Average survival probabilities of a surface warship

Note. Blue (red) bars indicate cases of evasive maneuvering (evasive maneuvering with of a hard-kill defense).

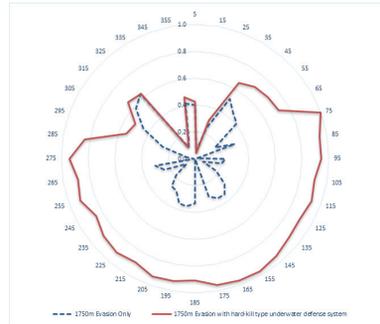
수상함의 적 어뢰 탐지의 최대거리에 따른 생존율을 살펴보면(Figure 9), (a), (b)를 포함하여 때때로 수상함 정면에서 적 어뢰 공격을 받는 경우에 생존율이 더 높게 나타났다. 이는 단측탐색모드로 접근하는 적 항적추적어뢰가 정면에서 수상함 항적에 진입한 경우, 수상함 기동 방향으로 추적하는 경우가 아닌 수상함 기동 반대 방향으로 진입한 경우가 다수 발생하기 때문이었다. 반면에 TACM 알람 거리가 증가했음에도 불구하고 수상함 정면 ±25 이내에서 적 어뢰가 공격해오는 경우 수상함의 생존율이 낮아지는 경우가 발생한다((c)~(f)). 이는 수상함이 회피기동 후에 발생하는 직선 경로에 적 항적추적어뢰가 진입하였기 때문이다. 그러나 하드킬 방식의 수중방어체계 운용 시 TACM 알람 거리가 증가하면 수상함의 생존율이 증가한다는 것을 알 수 있다.

또한, 수상함의 적 어뢰 탐지거리가 2,000m 이하일 때 수상함 정면에서 접근하는 적 어뢰에 대해 하드킬 방식의 수중방어체계를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우의 생존율 차이가 거의 존재하지 않는다. 이는 수상함에서 발사된 어뢰와 적 어뢰의 초기 위치가 너무 근접해있어 정확한 탐색단계와 공격단계를 위한 시간이 주어지지 않기 때문이다. 따라서 수상함 전방에서 근접해오는 적 어뢰를 무력화하기 위해서는 최소 2,000m 이전에 적 어뢰를 탐지할 수 있는 탐지능력이 필요하다고 할 수 있다. 마지막으로, 하드킬 방식의 수중방어체계를 적용한 경우가 회피기동만 한 경우보다 훨씬 높은 함정의 생존율을 보장함을 알 수 있다. 이를 통해 현재 항적추적어뢰에 대한 대책이 회피기

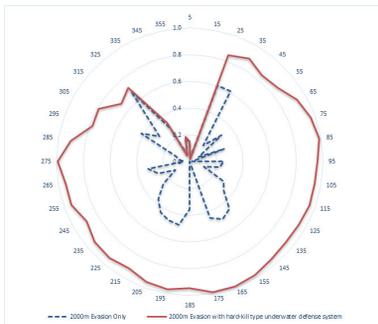
동 이외에 뚜렷한 방법이 존재하지 않는 상황에서 하드킬 방식의 중요성과 필요성이 더욱 강조된다고 할 수 있다.



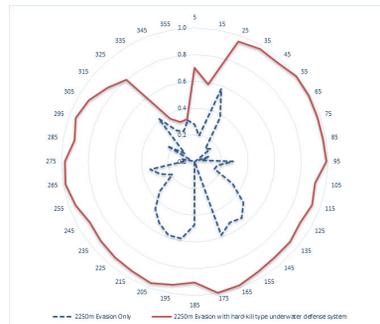
(a) The maximum torpedo alarm range of a warship = 1,500m



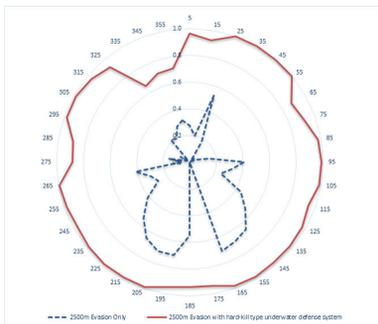
(b) The maximum torpedo alarm range of a warship = 1,750m



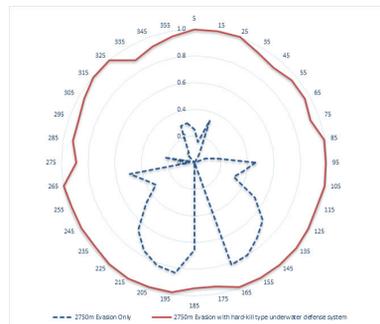
(c) The maximum torpedo alarm range of a warship = 2,000m



(d) The maximum torpedo alarm range of a warship = 2,250m



(e) The maximum torpedo alarm range of a warship = 2,500m



(f) The maximum torpedo alarm range of a warship = 2,750m

<Figure 9> Average survival probabilities depending on the maximum torpedo alarm range of a surface warship

Note. Blue dotted lines indicate cases of evasive maneuvering only and red bold lines indicate cases of evasive maneuvering with a hard-kill defense system.

IV. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 항적추적어뢰에 대항하기 위한 하드킬 방식의 수중방어체계에 대한 수상함의 생존율을 분석하였는데, 기만기에 기만되지 않는 항적추적어뢰에 대하여 회피기동과 하드킬 방식의 방어체계를 고려하였다. 시뮬레이션 실험 결과, 어뢰음향대항체계의 적 어뢰 탐지성능에 따라 수상함의 생존율이 증가하는 경향이 나타났다. 하지만, 하드킬 방식의 수중방어체계 없이 회피기동만을 실시한 경우에 TACM 알람 거리에 따라 최소 21%에서 최대 34%의 낮은 생존율을 보였으나 하드킬 방식의 수중방어체계를 사용했을 때 최소 61%의 생존율을 보여주었다. 특히, TACM 알람 거리가 2,000m 이상인 경우 80% 이상의 수상함 생존율이 나타났다. 이런 결과를 토대로 항적추적어뢰에 효과적 대응을 위해 하드킬 방식의 수중방어체계의 필요성을 제기하고, 관련 체계의 기본적인 요구조건을 제시할 수 있을 것이다.

본 연구의 학술적 의의에도 불구하고 하드킬 방식의 어뢰 성능을 임의로 가정하였다는 점에서 현실성 반영에서 제한점이 있다고 볼 수 있다. 추후 연구는 수중 환경(수온, 파고, 음속 등)을 고려하여 실현 가능한 성능이 반영된 연구설계가 필요하며, 이를 통해 수상함의 생존율을 계산한다면 더 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있을 것이다. 또한, 본 연구는 항적추적방식의 공격어뢰를 가정하였으나 실제 상황에서 발생하는 적 공격어뢰의 종류(항적추적어뢰, 음향탐지어뢰, 음향탐지 후 항적추적 어뢰, 선유도어뢰 등)와 운용형태(단발, 2발 이상 발사하는 Salvo 형태)를 연구설계에 반영하는 것이 현실적으로 어렵다. 그러므로 후속 연구는 더욱 강건한(robust) 시뮬레이션 분석을 위해 관련 방어체계의 다양한 운용전략(잠수함 추적 항공기(예 : 포세이돈 활용한 합동작전))을 시나리오로 고려한 연구설계가 필요할 것이다.

Acknowledgements

Declaration of Conflicting Interests

The authors declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Author contributions

Conceptualization: SM, HW, and LJ; Literature review: HW and LJ; Resources and Data curation: SM and HW; Investigation and Methodology: SM, HW, and LJ; Writing: SM, HW, and LJ; Project administration and Supervision: LJ.

Reference

- Bae, H. S., Kim, W. K., Son, S. U., Kim, W. S., & Park, J. S. (2021). A Study on the Ship Wake Model under the Ocean Environment. *Journal of the Korean Military Science and Technology Society*, 24(1), 22-30. <https://doi.org/https://doi.org/10.9766/KIMST.2021.24.1.022>
- Cho, H. J., & Kim, W. J. (2021). Research on Experimentation Methodology for Analysing Parameter Sensitivity of Hard-Kill Torpedo Defence System in Engagement Stage. *Journal of the Korea Society for Simulation*, 30(1), 21-29. <https://doi.org/10.9709/JKSS.2021.30.1.021>
- Friedman, N. (1994). Start Worrying about Wake Homing Torpedoes. Proceeding, Naval Institute, 123-124. Retrieved from <https://www.usni.org/magazines/proceedings/1994/september/world-naval-developments-start-worrying-about-wake-following>
- George, J., Joseph V, J., & Santhanakrishnan, T. (2019). System of Systems Architecture for Generic Torpedo Defence System for Surface Ships. *Advances in Military Technology*, 14(2), 307-319. <https://doi.org/10.3849/aimt.01330>
- Ha, S., Cha, J. H., & Lee, K. Y. (2010). Analysis of Detecting Effectiveness of a Homing Torpedo using Combined Discrete Event & Discrete Time Simulation Model Architecture. *Journal of the Korea Society for Simulation*, 19(2), 17-28. UCI : G704-001508.2010.19.2.004
- Hong, J. H., & Kim, T. G. (2010). Interoperation between Engineering- and Engagement-level Models for System Effectiveness Analysis. *Journal of the Korea Society for Simulation*, 19(4), 319-326. UCI : G704-001508.2010.19.4.025
- Kim, T. K. (2014). System Operational Performance Analysis for Wire-Guided Torpedo. *Journal of the Korea Society for Simulation*, 23(2), 7-15. UCI : G704-001508.2014.23.2.002
- Ku, B. H., Lee, Y. H., Park, J. M., Chung, S. M., Hong, W. Y., Kim, W. S., Lim, M. T., & Ko, H. S. (2009). Robust Ship Wake Search Method in the Target Evasion Environment. *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 12(1), 8-17. UCI : G704-001584.2009.12.1.012
- Kwon, S. J., Seo, K. M., Kim, B. S., & Kim, T. G. (2012). *Effectiveness analysis of anti-torpedo warfare simulation for evaluating mix strategies of decoys and jammers*. In Advanced Methods, Techniques, and Applications in Modeling and Simulation: Asia Simulation Conference 2011, Seoul, Korea, November 2011, Proceedings (pp. 385-393). Springer

- Japan. https://doi.org/10.1007/978-4-431-54216-2_42
- Lee, Y. H., Ku, B. H., Chung, S. M., Hong, W. Y., & Ko, H. S. (2010). Robust Search Method for Ship Wake Using Two Wake Sensors. *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, 29(3), 155-164. UCI : G704-000215.2010.29.3.007
- Liang, Q., Luo, M., Wang, Y., & Hao, X. (2022). Multi-attacks effectiveness evaluation of UUV based on wake guidance. *Ocean Engineering*, 266(1), 112654. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112654>
- Park, J. M. (2008). *Effectiveness Analysis of an Acoustic Homing Torpedo*. [Master dissertation, Korea University]
- Park, J. M., Ku, B. H., Lee, Y. H., Ryu, D. G., Hong, W. Y., Ko, H. S., & Lim, M. T. (2011). Effectiveness Analysis for a Lightweight Torpedo Considering Evasive Maneuvering and TACM of a Target. *Journal of the Korea Society for Simulation*, 20(4), 1-11. UCI : G704-001508.2011.20.4.009
- Seo, K. M., Song, H. S., Kwon, S. J., & Kim, T. G. (2011). Measurement of effectiveness for an anti-torpedo combat system using a discrete event systems specification-based underwater warfare simulator. *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, 8(3), 157-171. <https://doi.org/10.1177/154851291039024>
- Shin, M. I., Cho, H. J., Lee, J. H., Lim, J. S., Lee, S. J., Kim, W. J., Kim, W. S., & Hong, W. Y. (2016). Effectiveness Analysis for Survival Probability of a Surface Warship Considering Static and Mobile Decoys. *Journal of the Korea Society for Simulation*, 25(3), 53-63. UCI : G704-001508.2016.25.3.002
- Zhan, K., Yu, B., & Wang, J. (2011). Simulations of the anti-torpedo tactic of the conventional submarine using decoys and jammers. *Applied Mechanics and Materials*, 65, 165-168. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.65.165>

항적추적어뢰에 대항하는 하드킬 방식의 수상함 수중방어체계 효과도 분석

신명인* · 홍우영** · 이진호***

국문초록

본 연구는 적의 항적추적어뢰 공격에 대항하기 위한 우군 수상함의 하드킬 방식 수중방어체계의 효과를 분석하기 위한 시뮬레이션을 수행한다. 항적추적어뢰 공격 시 수상함은 하드킬 방어체계인 음향추적어뢰를 발사함과 동시에 회피기동을 하는 것으로 가정하며, 어뢰의 발사각 계산에 확률적 오차를 부여하여 몬테카를로 반복 시뮬레이션을 통해 수상함의 생존율에 대한 효과도 분석을 실시한다. 이때 수상함이 회피기동만 실시할 경우와 회피기동을 하며 하드킬 방어체계를 함께 사용하는 경우로 구분하여 시뮬레이션을 수행하였다. 수상함의 어뢰 최대탐지거리 및 적 어뢰 최초위치를 변수로 설정하여 생존율을 관측하였으며, 실험 결과 수상함이 항적추적어뢰의 공격을 받을 때, 하드킬 방어체계가 없는 경우 함정의 생존율이 최대 34% 수준인 반면 하드킬 수중방어체계가 있는 경우 최소 61% 이상의 생존율을 나타냈다. 이를 바탕으로 하드킬 방어체계가 항적추적어뢰의 공격으로부터 생존율을 더욱 높일 수 있음을 수치적으로 입증하였다.

주제어 : 항적추적어뢰, 하드킬 방식 수중방어체계, 시뮬레이션, 효과도 분석

* (제1저자) 국방과학연구소, 선임연구원, myoungin@add.re.kr, <https://orcid.org/0000-0003-3456-8123>.

** (공동저자) 세종대학교 국방시스템공학과, 교수, wyhong@sejong.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-9022-8425>.

*** (교신저자) 해군사관학교 국방경영학과, 교수, jhlee@navy.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0003-4192-3912>.