

하드-킬 어뢰 방어체계 최종 교전단계에서의 파라미터 민감도 분석을 위한 모의시험 모델 연구

조현진[†] · 김완진

Research on Experimentation Methodology for Analysing Parameter Sensitivity of Hard-Kill Torpedo Defence System in Engagement Stage

Hyunjin Cho[†] · Wanjin Kim

ABSTRACT

This paper introduces experimental design and components model for analysing the impact of parameter(in the field of kinematics and sensor) on performance of hard-kill torpedo defence system. The simulation is implemented at the level of engagement and its scope is limited to final stage of engagement where main function of anti-torpedo system is operating. It improves the fidelity of physical realism by precise model of simulation components in the perspectives of kinematics, sensor capability and acoustic detection theory. This paper provides the experimentation methodology for evaluating parameter sensitivity which is required to analyze in advance of development the defense system with novel concepts. In addition, the experimental result shows the tendency of defense capability according to parameter adjustments.

Key words : Hard-kill defence, Torpedo, Engagement level M&S, MOE

요약

본 연구에서는 하드-킬 방식 어뢰 방어체계의 운동 및 센서 분야 주요 파라미터가 방어 성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험 설계 및 구성요소 모델에 대해서 소개하였다. 시뮬레이션은 적-아 플랫폼이 상호작용하는 교전수준에서 구현되었으며, 방어체계의 핵심 성능을 측정할 수 있는 종말 단계로 범위를 한정하였다. 한편 공학수준 시뮬레이션의 주요 관심사항인 기동(Kinematics), 센서 성능, 음향탐지 이론에 대해 세부적으로 모사하여 현실 충실도를 높였다. 본 연구는 새로운 운용 개념을 가진 무기체계 개발 시 선행되어야 하는 성능 영향 요인 분석을 위한 방법론을 제시하고 있으며 실험을 통하여 주요 파라미터 변화에 따른 방어 성능 변화를 확인 할 수 있었다.

주요어 : 하드-킬 방어체계, 어뢰, 교전수준 M&S, 효과도 분석

1. 서론

수상함과 잠수함에게 절대적 위협이 되는 어뢰는 제어 및 신호처리 등 요소 기술들의 발전에 힘입어 다양한 공격 전술을 구사하고 상대의 기만책에 대응이 가능하도록

기능화 되었다. 특히 주류를 이루었던 음향신호 기반의 탐지, 추적, 유도 등의 공격방법을 벗어나 항적(Wake) 추적어뢰, 초공동(Supercavitation) 어뢰, 핵어뢰 등 새로운 개념의 무기 범주로 입지를 확장하고 있다. 이러한 양상에 따라 수동적 대응(회피기동, 피탐거부, 어뢰장갑 등) 및 소프트-킬(Soft-kill, 기만기 사용) 위주의 대응 전술을 벗어나 하드-킬(Hard-kill) 방식의 대응으로 위협 근원을 제거하고자 하는 연구가 진행되고 있다(DoD, DOT&E 2016; Atlas Elektronik).

본 연구에서는 자함 방어를 위한 적 어뢰 하드-킬 방어 체계(요격어뢰, Anti-Torpedo-Torpedo(ATT))에 대한 연

Received: 6 November 2020, **Revised:** 4 January 2021,
Accepted: 20 January 2021

[†] **Corresponding Author:** Hyunjin Cho
E-mail: hihjcho@webmail.korea.ac.kr
Department of Electrical Engineering,
Korea Naval Academy, Jinhae, Korea

구를 수행하였다. 방어체계는 수중에서 고속으로 접근하는 적 어뢰를 탐지/식별하여 직접 요격하는 개념으로 운영된다. 이는 공중 미사일 방어(Missile defence, MD) 체계의 개념을 수중에 적용한 경우로 이해될 수도 있으나, 무기체계를 운용하는 물리적 환경 조건이 상이하며 미사일 방어체계와는 달리 표적 경로에 대한 실시간 정보 제공이 불가능하다는 큰 차이가 존재한다(Defense News, 2019). 한편, 기존 어뢰의 형상과 동작 원리는 유사하지만 고속으로 이동하는 소형 표적에 근접 접근하여야 하며, 소량 전개만으로도 위협을 반드시 제거해야 하는 조건이 있다는 측면에서 차이가 존재한다. 이에 따라 어뢰 하드-킬 방어체계는 기동성과 정확성이 중요한 요소로 꼽히며, 유사 무기체계 개발 과정에서 고려하지 못한 공학/기술적인 파라미터도 체계 개발 성공여부에 중요한 변수로 작용 될 수 있다.

살펴본 바와 같이 어뢰 방어체계에 대한 효과도 분석을 위해서는 공학수준 파라미터에 대한 전반적인 선행 연구가 필요하나 이를 측정하기 위한 표준 실험 방법론은 없는 상황이며, 체계와 관련하여 연구 발표된 사례는 유도 알고리즘에 관련된 단편적이고 제한된 연구 내용이 전부이다(Huijuan and Xiyong, 2017; Zhang et al., 2018a and 2018b).

따라서 본 연구에서는 하드-킬 어뢰 방어체계의 운동 및 센서 분야 주요 파라미터가 방어 성능에 미치는 영향에 대해 분석을 수행하였으며, 본 논문을 통하여 실험 수행을 위해 구현한 시뮬레이터 개념 및 실험 방법을 소개하고자 한다.

본 논문의 2장에서는 연구 수행을 위한 시나리오 및 실험 가정에 대해서 설명하였다. 3장에서는 시뮬레이션을 구성하는 주요 요소인 적 어뢰와 요격어뢰 모델에 대한 설명과 함께 수중 표적 탐지 모델에 대해서 상세하게 설명하였다. 마지막으로 4장에서는 분석사례를 소개하였다.

2. 시뮬레이션 시나리오 및 가정

구체적인 운용 개념이나 개발하고자 하는 시스템의 세부 공학/기술 파라미터에 대한 범위가 명확하게 설정되지 않은 상황에서 무기체계 운용의 전체 주기를 모의하여 실험을 하는 것은 실험 설계 자체의 합리성에 대한 의구심과 함께 결론 도출 및 결과 분석의 어려움이 존재하게 된다. 이러한 측면에서 본 논문에서 다루는 방어체계에 대해서도 전체 주기를 모의한 실험보다 특정 단계에서 발생할 수 있는 시나리오를 상정하여 실험을 하는 것이

보다 신뢰성 있고 분석 가능한 결과를 도출해 낼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 방어체계의 핵심기능이 발휘되는 최종 교전단계에서 적 어뢰와 방어체계가 만나는 1:1 상황을 가정하여 실험을 설계하였다.

어뢰 방어체계와 적 어뢰가 교전하는 기본 시나리오와 실험 구현을 위한 가정 사항은 다음과 같다. 우선 적은 원거리에서 표적(우군 수상함)을 탐지하여 어뢰를 발사하였으며, 수상함은 어뢰 경보 시스템을 통하여 이러한 사실을 조기에 인지하고 어뢰 방어체제로 대응하는 시나리오를 상정하였다.

이러한 시나리오를 기본으로 방어체계와 적 어뢰 간 교전이 벌어지는 공간(Local simulation space)을 Figure 1과 같이 설계하였다. 교전 공간은 시뮬레이션 이전 각 플랫폼에서 발사된 어뢰가 최종 교전단계를 시작하는 임의의 공간을 의미한다.

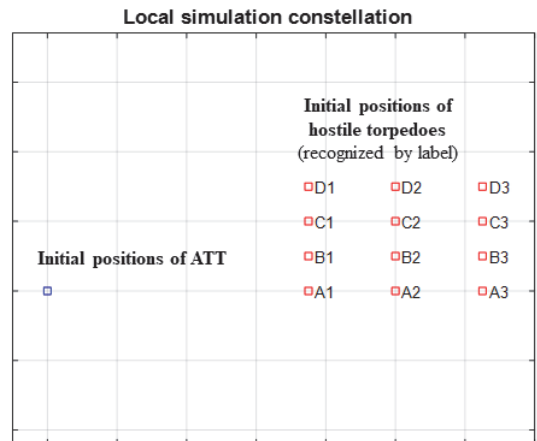


Fig. 1. Local simulation space & default position

원점에 위치한 파란색 사각형은 어뢰 방어체계의 최종 교전단계 최초 위치를 의미한다. 방어체계는 원점에서 시작하여 x축 방향으로 진행한다. 한편 붉은색 사각형은 적 어뢰의 최종 교전단계 최초 위치를 나타낸다. 수평, 수직 등간격으로 설정된 총 12개의 위치는 오른쪽에 표시된 레이블로 구분을 하였다. 모든 거리(어뢰 방어체계와 A1까지의 수평거리, 적 어뢰 최초위치 간 수평, 수직 거리)는 시뮬레이션 수행시 설정이 가능하여 방어체계와 적 어뢰가 조우 가능한 다양한 지리적 상황을 다룰 수 있도록 구현하였다. 실험의 통계적 결과(적 어뢰 요격 성공 여부)는 x축 기준 상하 대칭으로 나타나기 때문에 +y 축에 위치한 적 어뢰에 대해서만 고려하였다.

다음 가정 사항으로 시뮬레이션은 하드-킬 어뢰 방어 체계와 적 어뢰의 교전상황만을 모의하며 다른 어뢰 대응수단(기만기, 수상함의 회피기동 등)은 고려되지 않았다. 이러한 가정을 통해 어뢰 방어체계의 파라미터가 적 어뢰 요격 성능에 미치는 영향을 정확하게 측정할 수 있도록 하였다.

마지막으로, 시뮬레이션은 교전 수준에서 구현되었다 (DoD, 1995). 한편 공학 수준 시뮬레이션의 주요 관심사항인 어뢰 운동(Kinematics), 센서 성능, 음향학(소나 방정식) 측면을 세부적으로 모사하여 전체 시뮬레이션의 현실 충실도를 향상시켰다.

3. 시뮬레이션 구성요소 모델

이번 장에서는 시뮬레이션 상호 교전 플랫폼인 적 어뢰, 하드-킬 어뢰 방어체계에 대한 모델과 표적 탐지 여부를 판단하는 모델에 대해서 소개한다.

3.1 적 어뢰

앞서 간략하게 언급한 바와 같이 적 어뢰의 최초 위치는 12개로 설정하였다. 어뢰 방어체계가 가장 근접한 A1 위치는 원점과 R_1 떨어져 있으며, 적 어뢰 각 위치 간 수평거리는 R_2 , 수직거리는 R_3 로 설정하였다(Figure 2). 거리는 자유롭게 조정 가능하여 다양한 상황을 모사할 수 있도록 하였다. 적 어뢰는 최초위치에서 출발하여 임의의 수상함 표적이 존재하는 좌반구(좌측방향)을 향해 등속 직선 기동을 한다. 표적은 원거리에 위치하고 어뢰 대비 느린 상대속도로 인해 표적 추적 과정 중 어뢰의 침로 변화는 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하였다.

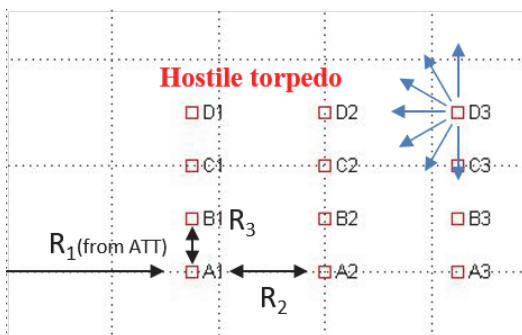


Fig. 2. Hostile torpedo default setting

적 어뢰 침로는 진방위 090 ~ 270도에 대해 30도 방위 간격으로 총 7개의 침로를 선정하였다. 이를 적 어뢰

의 최초 위치와 함께 고려한다면 위치 및 운동(침로) 특성 측면에서 총 84개 (12개 최초 위치 × 7개 침로) 시뮬레이션 경우의 수가 발생한다. 최종 교전단계에서 적 · 어뢰의 조우 가능한 다양한 상황(Head-to-Head 및 측면이나 후면 접근 등)을 통하여 결과의 경향성을 확인하고자 하였다.

어뢰의 기동속도는 45 Knots이고 방사소음의 크기 (SL, Source Level)는 00 dB이다(Urick, 1983). 어뢰 방사 소음 패턴은 무지향성(Omni-directional) 패턴과 Cardioid 패턴을 고려하였다. 무지향성 패턴은 요격어뢰 표적 탐지능력과 관련된 실험 대조군으로, Cardioid 패턴은 실험군으로 활용하였다. 이를 통하여 어뢰 주요 소음원(프로펠러)에 의해 발생한 비대칭적 소음 방사 패턴과 이로 인한 피탐 효과의 차이를 모사하였다(Urick, 1983; Cho, 2019a)

3.2 하드-킬 어뢰 방어체계(요격어뢰)

원점 [0,0]에 위치한 어뢰 방어체계는 접근하는 적 어뢰를 무력화하기 위하여 진방위 000도(+x축)로 기동을 한다. 자체 보유한 소나(TOSO, Torpedo SONAR)을 이용하여 적 어뢰를 효과적으로 탐지하기 위해서 사형탐색을 통하여 탐지 범위를 확장하였다. 사형탐색은 주진행방향 좌우로 번갈아 선회하며 탐색하는 방법으로 사형탐색 시 회두속도는 00 %/sec이고, 주진행방향과의 최대 이탈각(sweep angle)은 00 °이다(Shin, 2007, Pak, 2008).

한편 표적이 탐지되면 비례항법 유도(PNG, Proportional Navigation Guidance) (Paul, 1994; Cho, 2018)로 전환하여 표적을 추격하게 된다. 표적 탐지 전후 어뢰 방어체계의 운동 패턴 변화와 함께 TOSO 운용 모드도 변화 된다. 표적 탐지 전 수동모드로 운용되는 TOSO는 표적 탐지 후 능동모드로 전환하여 표적 탐지의 정확성을 높인다. 표적 탐지 여부는 소나방정식에 의해 결정되는데 다음 절에서 보다 자세하게 다루었다.

추격과정 중 표적을 소실하는 경우 표적과의 거리에 따라 사형탐색 혹은 원형탐색을 수행한다. 사형탐색은 원형탐색을 위한 조건과 비교 하였을 때 상대적으로 원거리에서 표적을 소실하였을 때 수행하며, 원형탐색은 소실 지점 인근을 빠르게 돌아 표적을 재탐색하기 위한 방법이다. 원형탐색은 표적을 소실한 지점에서 마지막 표적을 접촉하였던 방향으로 회전하며 표적을 탐색한다. 만약 재탐색을 시작한 원점으로 돌아 올 때까지 표적을 탐지하지 못한다면 최초 원형탐색 방향의 반대방향으로 회전하며 재탐색을 지속한다. 따라서 전체적으로 8자 형태의 기

동형태를 가지며 표적을 탐색한다(Pak, 2008).

시뮬레이션 구동 시간 내에 사전 설정된 요격 성공 조건(적 어뢰 반경 〇〇 미터에 접근)을 만족하면 성공적으로 위협을 제거한 것으로 판단하였다. 적 어뢰와 어뢰 방어체계 모델에서 설정한 모든 파라미터는 실험 목적에 맞도록 변경 설정이 가능하며 이를 통하여 시뮬레이터의 유용성을 극대화 하였다.

3.3 탐지모델

방어체계가 표적(적 어뢰)을 탐지하는 방법은 표적과의 거리에 따라 수동탐지와 능동탐지로 구분된다. 수동탐지는 어뢰 방사 소음을 은밀하고 지속적으로 청취 할 수 있는 장점이 있으며, 능동탐지는 표적에 대한 정확한 정보 분석을 가능하게 한다.

수동탐지 모드에서 적용되는 소나방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$SE_p = SL_{TP} - TL_p - NL_p + DI - DT_p \quad (1)$$

여기서 SE_p 는 방어체계 수동소나에 수신되는 신호의 세기(Signal Excess)를 의미한다. 식 (1)의 우변에 존재하는 각 요소는 SL_{TP} (Source Level, 적 어뢰 음원준위), TL_p (Transmission Loss, 전달손실), NL_p (Noise Level, 소음 준위), DI (Directivity Index, 지향지수), DT_p (Detection Threshold, 탐지 임계치)이다. DT_p 는 SL 〇〇 dB의 소음원이 실험상 환경에서 탐지되는 성능을 고려하여 설정한 최대 탐지거리에서 SE_p 가 0 dB이 되도록 설정하였다.

능동탐지 모드에서 적용되는 소나방정식은 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$SE_A = SL_{Tx} - 2TL_A + TS - NL_A + DI - DT_A \quad (2)$$

앞서 수동 소나방정식과는 달리 SL_{Tx} 는 어뢰 방어체계 소나(TOSO)의 소나핑 음원준위를 의미하고, 송수신 왕복거리에 따른 전달손실이 고려되어야 하기에 $2TL_A$ 가 사용되었다. 수동소나와 능동소나에서 사용되는 주파수 대역이 상이하고 주파수에 따른 해양 환경 물리적 특징이 달라지기에 TL, NL에 밀접한 A(Active)을 덧붙여 수동소나 방정식의 기호 P(Passive)와 구분하였다. TS (Target Strength, 표적강도)는 표적에 입사된 음파 신호가 반사되어 나오는 강도를 의미한다. DT_A 는 DT_p 와 비

슷한 개념으로 소나핑 음원준위 〇〇 dB가 실제 해상 환경에서의 성능을 고려하여 설정한 최대 탐지거리에서 SE_A 가 0 dB이 되도록 설정하였다. 능수동 소나방정식을 구성하는 모든 요소의 단위는 dB이며, 항목별 세부적인 설명은 Urick(1983)과 Shin(2016)을 참고 바란다.

기본적으로 기존에 사용하던 기준(Cho et al., 2019b; Pak et al., 2011)과 같이 소나 센서의 빔폭(어뢰 중심축 기준 30도) 및 SE 값을 기반으로 표적탐지 여부가 결정되지만 현실 모사 충실도를 높이기 위하여 확률 기반의 탐지 개념을 도입하였다(Cho et al., 2019a). 즉, 빔폭 내에 존재하는 $SE > 0$ 의 표적에 대해서 100% 탐지 선언을 하는 것이 아니라 SE 값에 따라 이진결정 확률 모델(Binary decision probability model)을 만들고 매초 표적의 탐지여부를 Neyman-Pearson(NP) detector을 이용하여 판단하도록 하였다. 이는 수중에서의 표적탐지가 항상 잡음이 존재하는 상황에서 확률적으로 결정되는 현상을 반영한 것이다.

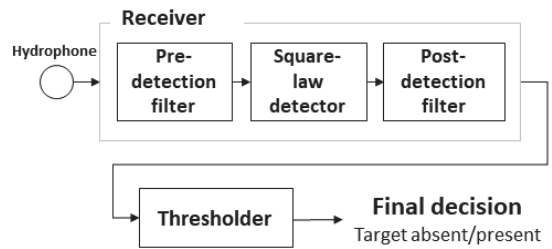


Fig. 3. Basic block-diagram of an energy detection system (or Envelope detector)

소나 시스템에서 확률 기반의 탐지와 관련된 개념을 이해하기 위해서는 하이드로폰(센서)에 입력된 신호에서 표적 존재 여부를 결정하는 일련의 신호처리 과정을 이해하여야 한다. Figure 3은 기본적인 에너지 탐지 시스템(혹은 포락선 탐지기)의 블록 다이어그램을 나타낸다. 일반적으로 배경잡음은 WGN(White Gaussian noise)으로 모사된다. 더불어 수식 전개의 간략화를 위하여 표적에서 방사된 신호와 표적에 맞고 돌아온 능동 소나핑은 단일 정현파로 가정한다. 따라서 표적이 존재하지 않는 상황(H_0)에서 센서에 입력되는 음향 신호 크기에 대한 확률 분포는 zero-mean Gaussian 분포를 따르고, 표적이 존재하는 경우(H_1)는 Gaussian 분포에 정현파 신호가 더해진 모델이 된다. 에너지 탐지 시스템의 신호처리 과정 중 제곱연산을 거치게 되면 신호값의 물리적 의미는 에

너지 개념으로 변화되는데 이에 대한 H_0 , H_1 각각의 확률 분포는 Rayleigh 식 (3)과 Rician 식 (4)의 분포를 따른다(Kang, 2018; Nielsen, 1991).

$$P_{H_0}(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right), \quad z \geq 0 \quad (3)$$

$$P_{H_1}(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Az}{\sigma^2}\right), \quad z \geq 0 \quad (4)$$

식 3과 식 4에서 σ^2 은 WGN 의 분산, A 는 정현파 신호의 크기, I_0 는 식 5와 같이 정의되는 0차 변형 베셀 함수(the modified Bessel function of zero order) 이다.

$$I_0(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^{2n}}{2^{2n}(2n)!} \quad (5)$$

결국 에너지 탐지 시스템이란 측정된 신호의 에너지 (z)를 바탕으로 앞서 유도된 확률 분포에 의해 표적의 존재 여부를 결정하는 시스템이다. 본 시뮬레이션에서는 실험 방법론 제안이라는 목적 및 수식 전개 of 간략화를 고려하여 중심 극한 정리(Central limit theorem)에 따라 신호 에너지의 확률 분포를 Gaussian 분포로 가정하였다. 이에 따라 소나 방정식에 의해 도출되는 신호 세기(SE_p , SE_A)에 의해 식 (6)과 같이 H_0 , H_1 두 개의 Gaussian 분포가 형성이 된다.

$$H_0: y \sim N(\mu_n, \sigma^2) \quad (6)$$

$$H_1: y \sim N(\mu_n + P_s, \sigma^2)$$

여기서 $N(\mu, \sigma^2)$ 은 평균 μ 와 분산 σ^2 을 가지는 Gaussian 분포를 의미하며, μ_n 은 잡음의 에너지 평균값을 P_s 은 고정된 신호의 에너지값을 각각 나타낸다.

이진결정(표적 유무) 탐지기는 NP detector을 사용하였는데 decision에 요구되는 priori probability 및 cost 설정 없이 H_0 및 H_1 에 대한 확률분포만으로도 손쉽게 탐지기를 설계 할 수 있는 장점을 가지고 있기 때문이다.

이진결정에서는 오경보 확률(P_{FA} , false alarm probability)이 시스템 성능 평가에 영향을 준다. SONAR 운용자가 설정한 P_{FA} 와 실제 수신된 신호의 세기에 의해서 최대의 탐지확률(P_D , detection probability)이 결정되며, 시뮬레이션 매초마다 표적의 탐지여부가 확률적(P_D)으로 결정되도록 구현되었다. 성능 분석을 위한 적 어뢰와 방어체계의 주요 파라미터 설정은 Table 1과 같다.

4. 분석사례

Figure 4는 개발된 시뮬레이터의 구동 화면 예이다. 앞서 표에서 제시된 파라미터 중 일부는 UI 상에서 손쉽게 설정이 가능하도록 구현하였다. 한편 임의의 변수설정 조건에 대해 애니메이션을 통하여 교전 전개 상황을 확인 할 수도 있고, 84개의 적 어뢰 위치, 침로별 조건에 대해서는 일괄 실행(Batch) 으로 실험 결과를 얻을 수 있도록 구현하였다.

각각의 경우에 대한 실험 결과를 요약성공, 요격실패 및 탐지불가 총 3개의 분류로 구분하였다. 여기서 요격성공은 방어체계가 적 어뢰를 요격(OO 미터 이내 근접 성공) 한 경우이며, 요격실패는 요격에는 실패하였으나 방

Table 1. Platform major parameter for simulations

	Hostile Torpedo	ATT
Initial position	12 different positions	Origin [0,0]
Maneuver State	Straight run (7 different courses)	Search ↔ Tracking ↔ Re-search
v, Speed [knots]	45	45 + α
$v_{\theta,Max}$, Max. angular velocity [deg/sec]	-	OO
θ_{BW} , TOSO Beam Width [deg]	-	30, 60
SL, Source Level [dB]	OO	OO (Active ping)
Noise pattern	Omni / Cardioid	-
Target detection distance [m]	-	OOOO
P_{FA} , False alarm rate	-	10^{-N}
Defence success criterion	-	distance less OO meters

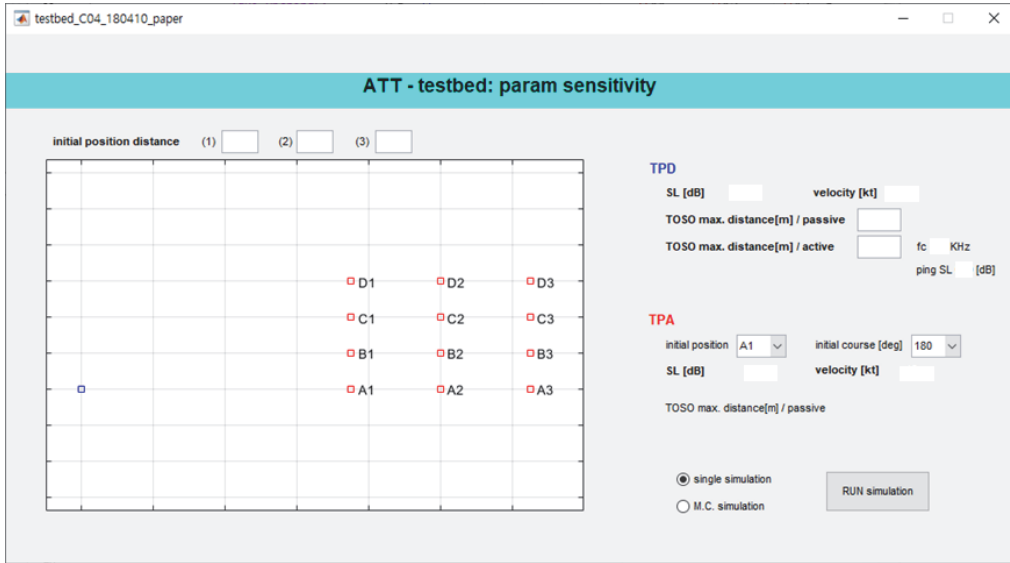


Fig. 4. Simulator UI

어체계의 파라미터 설정으로요격이 가능한 경우를 의미한다. 마지막으로 탐지불가는 방어체계가 적 어뢰를 탐지조차 하지 못한 경우로 체계의 주요 파라미터를 변경하여도 어뢰 방어가 불가능한 경우를 의미한다.

이번 연구를 통해 확인한 방어체계 실험 파라미터 중 변침 각속도[°/sec], TOSO 빔폭[°] 및 이동속도[Knots]와 관련된 실험결과 예를 살펴보도록 한다.

주어진 실험조건에서 적 어뢰 위치 및 침로에 따른 84개 상황에 대한 요격 성공여부 실험 결과는 Figure 5와 같다. 여기서 초록색은 요격성공(Success), 분홍색은 요격실패(Fail) 그리고 검은색은 탐지불가(Unable to detect)을 의미한다. Figure 5a의 경우 비례항법유도에 의해 도출된 회두각을 그대로 반영한 경우의 실험결과이다. 한편 이렇게 도출된 회두각은 표적의 속도, 거리 및 방위 등에 따라 현실적으로 구현 불가능한 값이 도출되기도 한다. 따라서 방어체계의 회두 성능을 일정 수치 제한을 주어서 실험을 할 필요가 있으며, 그렇게 얻어진 결과가 Figure 5b이다. 방어체계의 회두 각속도 성능에 따라 요격성공률에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있다(A2, C1, C2, D1, D2 위치의 적 어뢰 요격결과가 요격성공에서 요격실패로 변화).

한편 시뮬레이션을 통한 실험결과 뿐만 아니라 추적 과정 중 방어체계의 평균 변침 각속도 및 분산 정보를 도출하여 요격어뢰 운동 성능 분석에 참고자료로 활용 될 수 있도록 하였다. Figure 6에서 확인 할 수 있는 것과 같

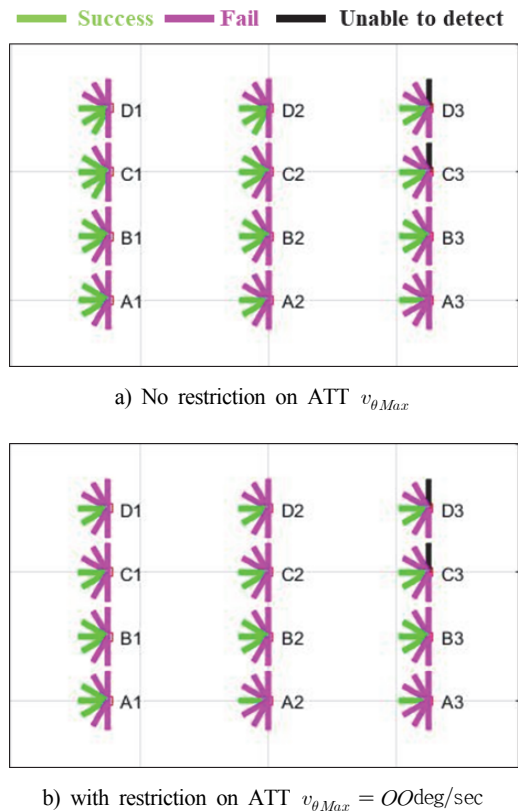


Fig. 5. The results of experiment (example)

이 요격어뢰가 적 어뢰를 측면에서 조우하거나 어뢰간 거리가 가까울수록 급격한 각속도 변화가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

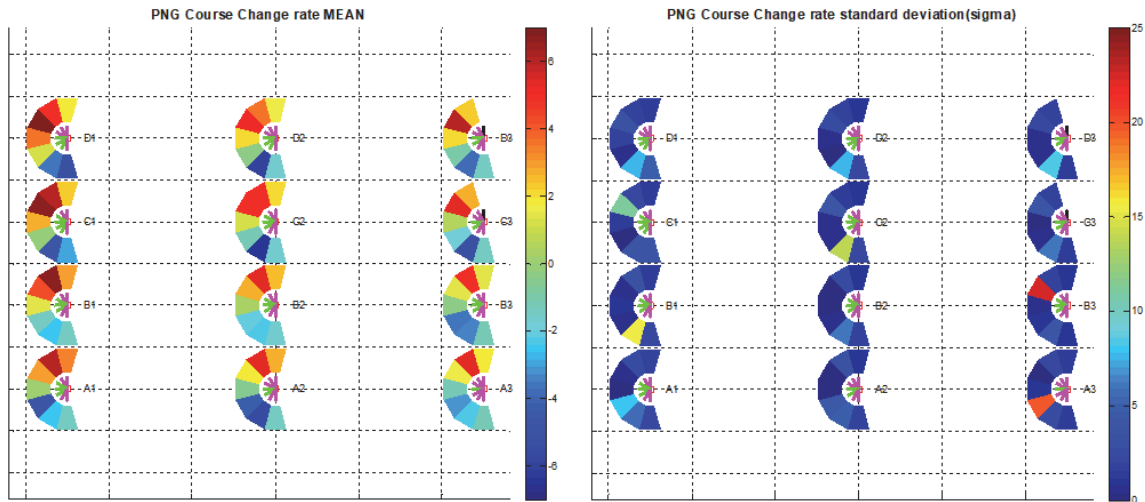
방어체계의 회두 능력, 속도, TOSO 빔폭 등의 파라미터 변화에 따른 요격성공 확률은 Table 2와 같다. 어뢰 방어체계의 성능은 방어체계 속도가 높아질수록, 탐지빔폭과 회두성능이 향상될수록 요격확률 또한 증가한다는 사실을 확인할 수 있었다. 특히 $v_{\theta Max}$ 의 변화에 따른 요격 성공률의 변화는 전체적으로 미약하며, 요격어뢰 속도 변화에 따른 영향력은 지대하다는 사실을 확인할 수 있었다. 한편 속도 증가에 따른 영향력은 α_1 에서 α_2 로 증가하는 경우 다소 완만해지는 것을 확인할 수 있었다.

Table 2. ATT success rate [%]

ATT	$v_{\theta Max}$	OO ₁		OO ₂		OO ₃	
	θ_{BW}	30	60	30	60	30	60
	Max speed [knots]	45	33.3	47.6	36.9	46.4	39.2
	$45+\alpha_1$	60.7	82.1	65.4	83.3	66.6	82.1
	$45+\alpha_2$	69	98.8	69	98.8	70.2	98.8

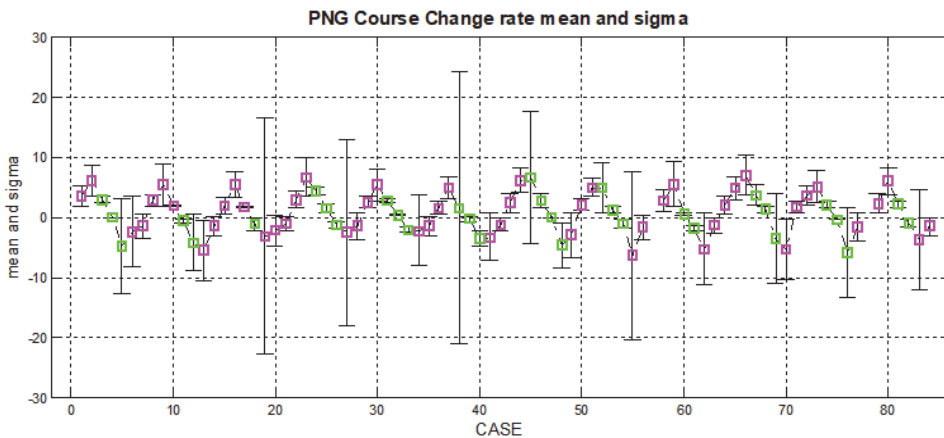
5. 결론 및 향후 연구계획

본 논문에서는 어뢰 방어체계의 운동 및 센서 분야 주요 파라미터가 적 어뢰 요격에 미치는 영향을 분석하기



(a) Angular velocity - mean

(b) Angular velocity - standard deviation



(c) Angular velocity: mean and standard deviation

Fig. 6. The results of experiment - angular velocity (example)

위한 시뮬레이터 구현 및 실험 방법을 소개하였다. 방어 체계의 핵심 성능이 발휘되는 종말 단계 교전상황으로 시뮬레이션 범위를 한정 하였으며 관심 파라미터를 자유롭게 변경하면서 최종 실험 결과를 확인 할 수 있도록 구현하였다.

실험에 대한 분석결과 일부 파라미터의 성능 증가가 항상 요격 성공률의 향상으로 이어지는 것은 아니며 일정 수치를 기준으로 성능 포화(saturation) 현상이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다. 더불어 특정 파라미터의 성능 변화는 다른 파라미터의 변화보다 최종 적 요격 결과에 더 민감하게 영향을 줄 수 있다는 사실도 확인할 수 있었다. 본 연구를 통하여 새로운 운용 개념의 무기체계 개발시 체계 성능에 영향을 주는 다양한 요인들의 분석을 위한 방법론을 제시하였으며, 이러한 시뮬레이션 결과는 체계 개발과정 중 요구 성능을 만족하기 위한 시스템 설계 단계에서 유용하게 활용 될 수 있을 것이라 예상된다.

향후 연구시 시뮬레이터의 파라미터를 보다 정교하고 다양하게 반영할 예정이며, 최종 요격성능과 관련된 파라미터들의 영향력에 대해서 정량적 분석을 수행할 예정이다.

References

- Atlas Elektronik, “SeaSpider, the Anti-torpedo-Torpedo”, Available at <https://www.seaspider.info/> (Accessed October 26. 2020)
- Cho, Hyunjin (2018). “Engagement Level Simulator Development for Wire-Guided Torpedo Performance Analysis” *Journal of the Korea Society for Simulation*, 27(1), 33-38.
- (조현진 (2018) “선유도어뢰 전술 효과도 분석을 위한 교전수준 모델 개발 연구.” *한국시뮬레이션학회 논문지* 27(1), 33-38)
- Cho, Hyunjin, W. Kim, S. Kim, H. Yang, H.K., Lee (2019) “Research on an Engagement Level Underwater Weapon System Model with Neyman-Pearson Detector” *Journal of the Korea Society for Simulation*, 28(2), 89-95
- (조현진, 김완진, 김상훈, 양호철, 이희광 (2019) “Neyman-Pearson 표적 탐지기를 적용한 수중 무기체계 교전수준 모델 개발 연구” *한국시뮬레이션학회 논문지*, 28(2), 89-95)
- Cho, Hyunjin, Myoungin Shin, Jinho Lee, Wan-Jin Kim, Woo Shik Kim, and Wooyoung Hong. “A study of the effectiveness analysis for survivability of a surface warship from a torpedo attack.” *Journal of Simulation* 13, no. 4 (2019): 304-315.
- Defense News(2019), “Navies, companies push for torpedo-killing torpedoes”, Available at https://www.defensenews.com/global/europe/2019/04/16/navies-companies-push-for-torpedo-killing-torpedoes/?fbclid=IwAR3OzWABf_W5yniz3b%E2%80%A6 (Accessed October 26. 2020)
- DoD, the Office of the Director, Operational Test and Evaluation(DOT&E) (2016), “Surface Ship Torpedo Defense (SSTD) system: Torpedo Warning System (TWS) and Countermeasure Anti-Torpedo (CAT)”, Available at https://www.dote.osd.mil/Portals/97/pub/reports/FY2016/navy/2016sstd_tws_cat.pdf?ver=2019-08-22-105306-167 (Accessed October 26. 2020)
- DoD 5000.59 (1995), “Modeling and Simulation (M&S) Master plan”
- Huijuan, Ye, and Zhang Xiyong (2017) “A new anti-torpedo torpedo's guidance law based on variable structure control.” 2017 3rd IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE). IEEE.
- Kang, Eyoung W. (2008) “Radar system analysis, design, and simulation”, Artech House, 2008.
- Pak, J.M., Effectiveness Analysis of an Acoustic Homing Torpedo, Master Thesis, Korea University, 2008. (박정민, “음향 유도 어뢰의 효과도 분석”, 석사학위논문, 고려대학교, 2008).
- Pak, J.-M., B.-H. Ku, Y.-H. Lee, D.-G. Ryu, W.-Y.Hong, H.-S. Ko and M.-T. Lim, “Effectiveness analysis for a lightweight torpedo considering evasive maneuvering and TACM of a target” *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol.20, No.4, 2011, 1-11
- (박정민, 구분화, 이영현, 류동기, 홍우영, 고한석, 임묘택 (2011) “표적 회피기동과 어뢰음향대향체계를 고려한 경어뢰의 효과도 분석” *한국시뮬레이션학회 논문지*, 20(4), 1-11.)
- Shin, Myoung In, H. Cho, J. Lee, J. Lim, S. Lee, W. Kim, W. Kim, W. Hong. (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

(신명인, 조현진, 이진호, 임준석, 이석진, 김완진, 홍우영. (2016) “부유식 및 자항식 기만기의 혼합 운용을 고려한 수상함의 생존율에 대한 효과도 분석”. 한국시뮬레이션학회논문지, 25(3), 53-63)

Shin, Ji-hwan (2007) “On the Development of Authoritative Representations of Torpedo Systems for Engagement Level Simulation” Journal of the Korea Society for Simulation, 16(3), 19-28

(신지환 (2007) “교전수준 어뢰체계 표준모델 개발 방안 연구” 한국시뮬레이션학회논문지, 16(3), 19-28)

Nielsen, Richard O. (1991) “Sonar signal processing”, Artech House, Inc.

Urick, R.J. (1983) “Principles of underwater sound 3rd” MacGrawHill, 1983

Zarchan, Paul (1994) “Tactical and strategic missile guidance(Book).” Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1994.

Zhang, Rui, et al. (2018) “Analysis of maneuver occupying angle of submarine launching anti-torpedo torpedo.” 2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). IEEE.

Zhang, Rui, et al. (2018) “Simulation of Anti-Torpedo-Torpedo Intercepting Trajectory and Analysis of Hit Probability under Sliding Mode Guidance.” 2018 10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). Vol. 1. IEEE.



조 현 진 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0003-1899-4616> / hjhjcho@webmail.korea.ac.kr)

2005 해군사관학교 정보통신공학과 학사

2009 Washington University in Saint Louis 전자시스템공학 석사

2016 고려대학교 전기전자전파공학과 박사

2016~ 현재 해군사관학교 전기전자공학과 교수

관심분야 : 수중 신호처리, 패턴인식



김 완 진 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-5633-3774> / kimwj@add.re.kr)

2005 부산대학교 전자전기통신공학부 학사

2007 부산대학교 전자공학과 석사

2011 부산대학교 전자공학과 박사

2011~ 국방과학연구소 선임연구원

관심분야 : 적응신호처리, 레이더 및 소나 시스템, 디지털 통신