

선유도어뢰 전술 효과도 분석을 위한 교전수준 모델 개발 연구

조현진[†]

Engagement Level Simulator Development for Wire-Guided Torpedo Performance Analysis

Hyunjin Cho[†]

ABSTRACT

This paper introduces the simulation concepts and technical approach of wire-guided torpedo performance analysis simulator, as a consequence, provide a framework for understanding overall attack procedures and effectiveness of tactics to torpedo operator. It described the mathematical models of simulation components and weapon engagement principle, especially it derived the closed-form solution of time consumption and leading angle problem of torpedo attack situation based on geographical assumption. In addition, it adopted the proportional navigation guidance at final stage of torpedo attack and also consider the tradeoff relation between target ship speed(propeller noise level) and detection probability, so that it improves the fidelity of physical realism. Simulator is developed with high degree of freedom in the perspective of tactical situation, and it helps user to understand the overall situation and tactical effectiveness.

Key words : Wire Guided Torpedo, Engagement level M&S, MOE, Naval tactics

요약

본 연구에서는 선유도 중어뢰의 전술 효과도 예측을 위하여 개발한 교전수준 시뮬레이터에 대해서 시뮬레이터 개발에 적용된 개념 및 구성요소 모델에 대해서 소개하고 있다. 특히 어뢰의 공격문제 해결을 위하여 기하학적 모델에 따른 해(Closed-form solution)를 도출하였고, 어뢰의 공격유도 방법에 비례항법 유도를 적용하여 구현하였다. 표적함에 대해서는 속도와 소음의 상충관계로 인한 피탐 가능성을 고려하였다. 어뢰의 초기위치에 따른 공격 소요 시간을 계산하고 이를 도시화 하는 과정을 통하여 도출된 해의 정확성을 확인 할 수 있었고, 현실적인 공격유도 방법 및 소음원 모사를 통하여 시뮬레이터 충실도를 높일 수 있었다. 시뮬레이터는 다양한 전술상황을 가정하여 결과를 분석 할 수 있도록 자유도가 높게 개발되었으며, 구성요소 궤적 분석 및 전방위 요격 성공률 분석이 가능하여 전장 상황의 흐름을 파악하고 전술에 대한 이해를 높이는 데 도움이 된다.

주요어 : 선유도 중어뢰, 교전수준 M&S, 공격 성공률, 효과도 분석, 전술

1. 서론

M&S(Modeling & Simulation)는 다양한 목적으로 많

* 이 논문은 2017년도 해군사관학교 해양연구소 학술연구과제 연구비의 지원으로 수행되었습니다.

Received: 13 September 2017, **Revised:** 23 January 2018,
Accepted: 25 January 2018

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

은 분야에서 이루어지고 있다. 특히 군에서 활용되는 M&S는 다루고자 하는 시물레이션의 규모(Hierarchy of M&S), 활용 단계(Functional Area), 구현 충실도(Degree of Physical Realism), 인간 참여도(Degree of Human Participation) 등의 분류 기준에 따라 다양한 형태가 존재한다(DoD, 1995; Piplani 1994).

어뢰 무기체계와 관계된 M&S 연구 사례를 살펴보면 어뢰의 탐지 효과도를 분석한 사례(Mjedle, 1977; Yoon, 1996)가 있으며, 모델의 표준화 작업을 통하여 교전수준(Engagement Level) 어뢰 체계모델을 제시하기도 하였

다(Shin, 2007). 그 밖에 실제 전장 환경에서 사용되는 대 어뢰 방어체계가 고려된 연구도 진행되었다(Ku, 2009; Pak, 2011; Shin, 2016). 선유도 중어뢰에 관련된 연구내용은 매우 제한적으로 발표(Kim, 2014) 되었는데, 이는 어뢰의 유도과정에 있어서 인간의 개입이 존재하는 독특한 분석 문제에 대해서 앞서 소개된 발사 후 망각(Fire & Forget) 방식 어뢰와는 전혀 다른 접근 방법을 사용해야 하는 어려움에 기인하였다고 볼 수 있다.

어뢰체계 M&S 의 활용 단계(Functional Area) 측면에서 기존 연구들을 살펴보면 무기체계 획득(Acquisition) 혹은 개발 초기 단계에서 체계 파라미터를 식별하여 성능 예측(Analysis and Prediction)을 하기 위한 목적의 연구가 주로 진행이 되었다. 반면 운용 중 효과적인 전술연구를 목적으로 한 시뮬레이션 개발은 경어뢰에 대한 연구(Lee, 2016)를 제외하고는 발표된 사례가 없다.

본 논문에서는 선유도 중어뢰 운용 중 발생 가능한 다양한 전술상황을 설정하고 공격성공률을 통한 전술효과도 예측 목적의 시뮬레이터 개발에 적용된 시뮬레이션 개념 및 모델을 소개하고자 한다. 우선 선유도 중어뢰가 가지는 공격단계를 외부유도 및 내부유도 단계로 구분하여 외부유도의 영향을 일정 부분 고려하였다. 더불어 내부유도 중 직선 탐색기동을 가정하여 경어뢰의 사형, 나선형 탐색 등의 방법과 차별을 두었다. 특히 어뢰의 공격 문제와 관련된 기하학적 모델을 시간에 관한 방정식으로 유도함으로써 구성 변수들(속도, 거리, 방위)의 변화에 따른 공격 가능 상황(위치), 소요시간 및 리드각에 대한 일반화된 해를 도출하였다. 표적 접촉 후 공격유도 방법에 있어서 비례항법 유도(PNG, Proportional Navigation Guidance) 방법(Zarchan, 2012)을 적용하여 보다 현실적인 모델로서 시뮬레이션이 가능하게 하였다. 본 논문의 2장에서는 시뮬레이션에서 가정한 상황 및 제한사항 등 기본적인 시뮬레이션 개념에 대해서 언급하고, 3장에서 시뮬레이션을 구성하는 객체 모델 및 실험 방법에 대해서 설명한다. 마지막으로 4장에서는 분석사례를 제시하였다.

2. 시뮬레이션 개념 및 논리

2.1 시나리오 가정 및 제한사항

선유도 중어뢰의 공격성공률에 기인한 전술상황별 효과도 분석을 위하여 다음과 같은 시나리오를 가정하였다. 중어뢰 발사 플랫폼은 원거리에서 표적을 접촉하여 공격을 위한 TMA 수행 후 어뢰를 발사하였다. 선유도에 의한 어뢰 유도 중 표적 OOKm 인근에서 내부유도로 유도

방법이 전환 되었으며, TOSO(Torpedo SONAR)에 의한 표적 탐색 및 표적 획득시 공격이 이루어진다. 표적함은 어뢰 발견시 회피기동 및 기만기 투하 등 대어뢰 회피전술을 수행한다.

시뮬레이션은 중어뢰의 내부유도부터 공격종료까지의 과정에 한정하였다. 이는 발사 플랫폼 작동수에 의한 외부유도 과정 중 순차적이고 상호 종속적으로 발생할 수 있는 Human error 영향을 배제하기 위한 목적이다. 대신 내부유도 전환 순간에 중어뢰가 제공 받는 표적정보에 대한 오차를 반영함으로써 인간 개입에 의한 오차 영향을 모사 하였다. 주어진 오차 조건에서 어뢰 무기체계 자체의 성능 및 표적의 대응 전술에 따른 효과도 분석이 이루어질 수 있도록 실험이 수행되었다.

2.2 어뢰 공격문제의 해결

발사 플랫폼에서의 TMA 및 어뢰 내부유도 전환시 공격침로의 결정은 기본적으로 충돌삼각형(Collision triangle) 형성을 목적으로 한다. 본 연구에서는 충돌삼각형을 시간(t)에 관한 방정식으로 모델링하여 실현 가능한 공격상황을 수학적으로 기술하였다.

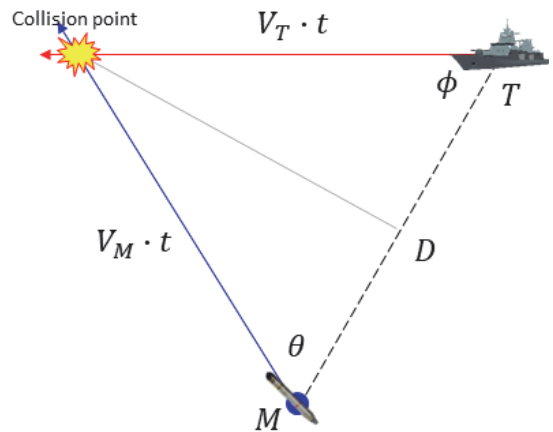


Fig. 1. Collision triangle

어뢰(M)와 표적함(T) 그리고 충돌위치(Collision point)가 이루는 삼각형을 충돌삼각형이라 하며, 삼각형 세변의 길이는 시간 변수(t)에 의하여 Figure 1과 같이 간략화 하여 나타낼 수 있다. Figure 1에서 V_M 은 어뢰의 속도, V_T 는 표적함의 속도, D 는 어뢰와 표적함 사이의 거리, 그리고 ϕ 는 표적함의 aspect이다. 어뢰 공격을 하기 전에 TMA를 통하여 V_T , D 및 ϕ 의 정보를 추정할 수 있으며 이에 따라 구성되는 충돌삼각형은 오차 성분이 포함되어 모델

이 된다. 하지만 본 장에서는 수식 표현의 간략화를 위하여 오차를 제외하고 유도하도록 한다.

삼각형에서 세변의 길이와 그 사이각의 관계는 아래의 식과 같다.

$$V_M t = \sqrt{(V_T t \cdot \sin\phi)^2 + (D - V_T t \cdot \cos\phi)^2} \quad (1)$$

식 (1)을 t에 대해서 정리하면 아래 식 (2)와 같이 t에 대한 2차 방정식으로 정리할 수 있다.

$$(V_M^2 - V_T^2) \cdot t^2 + 2DV_T \cos\phi \cdot t - D^2 = 0 \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 어뢰와 표적함의 속도에 따라 해(시간, t)의 존재 여부를 나눌 수 있다. 특히 $V_M^2 < V_T^2$ 인 경우, t는 2개의 양의 실수해를 가질 수도 있으며 구체적인 수치는 D와 ϕ 값에 의하여 결정된다. 충돌 삼각형이 형성되는 t를 구하여 삼각형 세변의 길이를 알아내면, 이를 이용하여 어뢰 공격문제 해결을 위한 리드각 θ 을 식 (3)에 의하여 계산 할 수 있다.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{D^2 + (V_M t)^2 - (V_T t)^2}{2DV_M t} \right) \quad (3)$$

2.3 적응논리

시물레이션을 구성하는 각 객체들은 앞서 기술한 시물레이션 시나리오 진행 과정 중 다음과 같은 논리 및 선택 사항을 가진다.

중어뢰의 운영상태는 탐색 - 표적 접촉 및 공격 - 재탐색(표적 소실시)의 3가지 상태를 반복한다. 표적 탐색을 위한 최초 침로는 앞서 2.2절에서 설명한 방법에 의해 결정된다. 기하학적으로 2가지 침로가 가능한 상황에서는 선택 운용 가능하다.

표적함은 기동 - 어뢰 발견 - 어뢰 대응전술 수행의 3가지 상태를 순차적으로 수행한다. 어뢰 대응전술은 함정 자체의 회피기동과 부유식 기만기 투하로 구분될 수 있는데, 2가지 전술의 조합으로 총 4가지 경우(회피기동 여부 및 기만기 사용 유무)에 대해 실험 수행이 가능하다.

3. 시물레이션 모델 및 실험 방법

3.1 중어뢰 모델

중어뢰의 최초위치(내부유도가 시작되는 위치)는 시물

레이터 운용자가 원점에 위치한 표적함을 기준으로 방위 및 거리를 결정함으로써 설정된다. 공격문제 해결시 표적함의 침로(X_c), 속도(X_v), 거리(X_D)에 대한 오차를 가우시안 확률을 적용하여 묘사하였다. 세 변수에 대한 가우시안 확률은 식 (4)와 같으며, Covariance matrix(Σ)는 diagonal matrix 로 가정하였다.

$$X \sim N(\mu, \Sigma) \quad (4)$$

where

$$\begin{aligned} \mu &= E[X] = [E[X_c], E[X_v], E[X_D]]^T \\ \Sigma &= E[(X - \mu)(X - \mu)^T] \\ &= \text{diag}(\sigma_c^2, \sigma_v^2, \sigma_D^2) \end{aligned}$$

여기서 σ 는 각 변수의 표준편차(Standard deviation)를 의미한다.

초기 어뢰 기동시 예측된 충돌위치로 등속 직진 기동을 하며, 기동 중 TOSO에 의해 표적이 탐지될 경우 증속(+10KT) 후 비례유도 항법에 의해서 유도된다. 표적 소실시 소실한 표적과의 상대거리에 따라 사형탐색 혹은 원형탐색을 수행한다.

TOSO에 의한 표적 탐지는 소나방정식에 의한 SE (Signal excess) 및 TOSO 범폭에 의해서 결정된다. 즉, 임의의 소음원에 대해 탐지를 선언하기 위해서는 $SE > 0$ 와 설정된 범폭내에 표적이 존재하여야 한다. SE는 다음과 같은 세부 요소로 구성되었다.

$$SE = SL - TL - NL + DI - DT \quad (5)$$

식 (5)의 우변에 존재하는 각 요소는 SL(Source Level), TL(Transmission Loss), NL(Noise Level), DI(Directivity Index), DT(Detection Threshold)이며, 각 요소에 대한 세부적인 설명은 참고자료(Shin, 2016; Urick, 1983)와 동일하다.

표적함정 기동에 변화가 없다면 최초 계산된 충돌위치의 오차범위 안에서 공격성공 여부가 결정되었지만, TMA 오차의 보정 및 표적함정의 회피기동에 따른 어뢰 제어를 위하여 비례항법 유도가 필요하다.

Figure 2는 2차원 좌표평면에서 어뢰와 표적의 교전(engagement)을 단순화하여 표현한 기하학적 구조이다. 앞서 Figure 1에서 언급한 충돌삼각형을 형성하기 위하여 비례항법유도에서는 LOS에 수직성분(Normal component)인 n_c 을 조정하여 어뢰를 제어한다. 비례항법유도는 수학

적으로 식 (6)과 같이 표현된다.

$$n_C = N V_C \dot{\lambda} \quad (6)$$

여기서 N은 무단위 이득(Unit-less gain), V_C 는 어뢰 표적의 접근속도 그리고 λ 는 LOS 각도이다.

어뢰는 표적함 0 미터 반경에 접근하면 공격성공으로 판단하고, 지정된 시간(어뢰 작동시간) 내에 공격을 성공하지 못하면 표적함은 생존한 것으로 판단하였다.

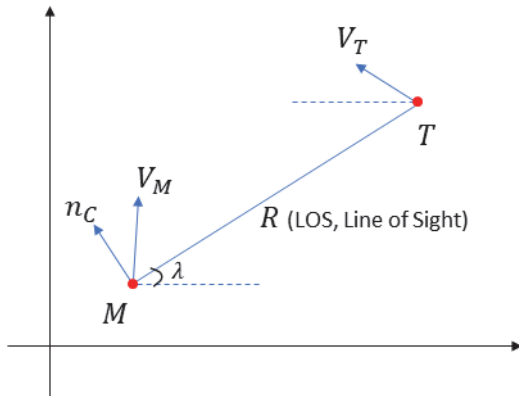


Fig. 2. Engagement geometry on two-dimension

3.2 표적함 및 기만기 모델

표적함은 최초 원점 [0,0]에 위치하여 x축 방향으로 등속기동하는 것으로 가정하였다. 기동 중 어뢰발견시 어뢰 대항전술을 수행하며 이는 회피기동과 기만기 투하로 구분된다.

어뢰발견에 따른 회피기동 침로는 앞선 연구결과(Ku, 2009)의 것을 참조하였다. 다만, 센서 성능에 따른 어뢰 발견방위(ψ)의 모호성을 모사하기 위하여 가우시안 확률, 식 (7)에 따른 오차를 추가하였다.

$$f(\psi) = \frac{1}{\sigma_\psi \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\psi - \mu_\psi)^2}{2\sigma_\psi^2}\right) \quad (7)$$

오차 반영에 따른 회피 침로의 가변성과 함께 회피기동시 속도증속 여부 및 그 정도를 조정 할 수 있도록 하였다. 이에 따라 위험지역의 신속이탈과 함정 소음증가로 인한 피탐 가능성의 상충관계를 모사하였다. 속도와 소음의 관계는 경험에 의해 만들어진 식 (8)에 따른다(Urick, 1983).

$$SL = 60\log K + 9\log T - 20\log F + 20\log D + 35 \quad (8)$$

여기서 K는 속도[Knots], T는 배수량[ton], F는 주파수[KHz] 그리고 D는 거리[yards]이다.

그 밖에 침로 변경시 관성 및 유효타력 등에 의해 발생하는 종거, 횡거, 전술선회경 등의 개념(Pak, 2011)을 반영하였다. 기만기는 부유식 기만기 사용을 가정하였으며 (Shin, 2007), 기만기의 투하 방위 역시 식 (7)에 따른 어뢰 발견방위에 따라 결정된다.

함정과 기만기의 음원준위(SL) 기준값은 참고문헌(Urick, 1983) 10.6절의 내용을 활용하였다. 소음 방사패턴의 경우, 기만기는 무지향성(Omni-directional) 패턴을 적용하였지만, 함정의 경우 프로펠러가 위치한 함미에서 기준 SL이 측정되고 함수로 갈수록 그 수치가 줄어드는 Cardioid 패턴으로 모사하였다(Pak, 2008).

3.3 실험방법

임의의 변수설정에 대해 1회 실험 옵션으로 시뮬레이터를 실행하면 시간에 따른 각 구성요소들의 기동을 애니메이션으로 확인 할 수 있도록 하였다. 이를 통하여 전체적인 전장 상황의 흐름이 어떻게 진행되는지 운용자도 쉽게 확인 할 수 있다.

이와 함께 설정된 변수에 대해서 반복실험(Monte Carlo simulation)을 통하여 표적함 기준 360도 전방위에 대한 어뢰 공격 성공률을 확인 할 수도 있다. 이 경우 360도 방위를 약 3.6도 간격, 100개로 균일등분하여 각 방위당 500회의 반복실험이 수행된다. 매 반복실험마다 어뢰의 TMA 오차 및 표적함의 센서 오차에 의해 서로 다른 교전상황이 전개가 되고, 해당방위에 대한 최종적인 공격 성공률이 산출된다. 반복실험을 수행하더라도 매 실험에 대한 구성요소들의 궤적정보를 포함한 모든 정보를 저장하여 추후 원인분석이 용이하도록 하였다.

4. 분석사례

어뢰 공격문제 해결을 위한 기하학적 모델 방정식을 이용하여 임의의 조건에 대해 각 위치별 표적함 공격에 필요한 시간을 도시하면 Figure 3과 같다. 2.2절에서 언급한 바와 같이 어뢰와 표적함의 속도관계에 따라 다양한 형태로 해가 존재함을 확인 할 수 있다.

Figure 4는 개발된 시뮬레이터의 구동화면 예제이다. 설정된 시뮬레이션 조건에 따라 구성요소들의 궤적을 전시하고 있다. 이를 통하여 어뢰의 직주기동부터 시뮬레이

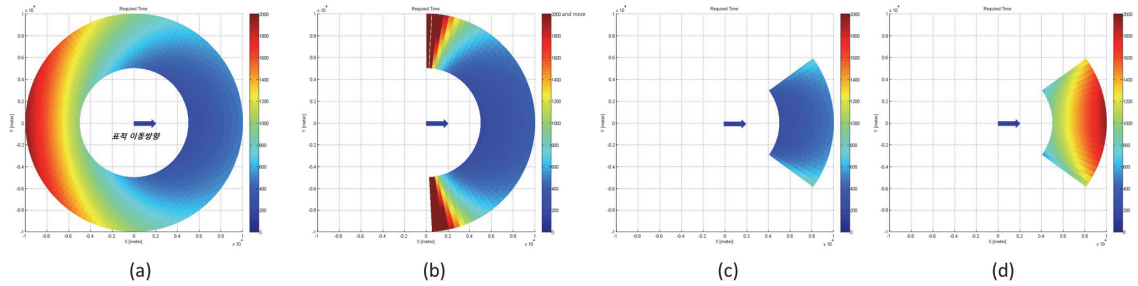


Fig. 3. torpedo attack time consumption (example)

(a) $V_M^2 > V_T^2$ case (b) $V_M^2 = V_T^2$ case (c), (d) $V_M^2 < V_T^2$ case (min and max time, respectively)

선의 종료시점까지 발생하는 다양한 이벤트(기만, 표적회득 및 PNG 유도)를 분석하여 전술의 이해 및 전장 상황의 흐름을 쉽게 파악할 수 있다.

Figure 5와 6은 임의의 조건에 대해 반복실험에 따른 전 방위 공격 성공률 예를 보여준다. 이때 방위 기준은 표적(수상함)의 함수이다(함수 0도 기준, CCW 방위). 직관적인 예상과 같이 표적함의 회피기동과 기만을 사용하는 경우 어뢰의 공격률이 낮아지는 것을 확인 할 수 있다.

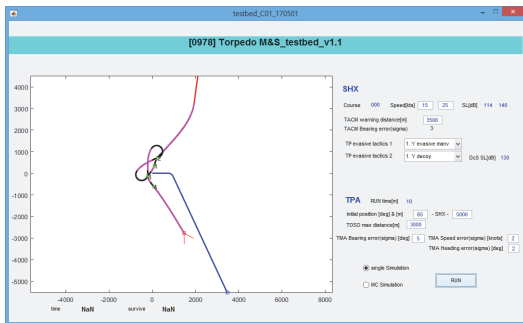


Fig. 4. Simulator UI

5. 결론 및 향후 연구계획

본 논문에서는 선유도 중어뢰의 전술 효과도 예측을 위하여 개발한 시뮬레이터에 대한 개념 및 구성요소 모델링에 대해서 소개하였다. 특히, 어뢰 공격문제 해결을 위한 기하학적 모델링 과정에서 시간에 대한 방정식을 기초로 공격 소요시간 및 리드각에 대한 해를 유도하였다. 이와 함께 어뢰의 공격 알고리즘 및 표적함의 소음방사 모델에 있어서 시뮬레이터 충실도를 높였다. 전술상황 표현에 있어 자유도가 높은 시뮬레이션을 개발함으로써, 전술에 대한 이해 및 효과도 예측에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다. 추후 연구시 협대역 소음신호 분석 기

능 및 해양 음파전달 환경 모사 기능을 추가 할 예정이다.

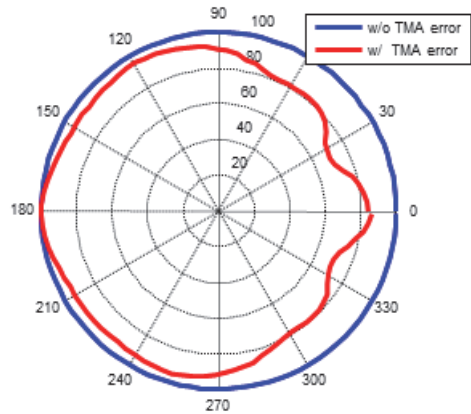


Fig. 5. torpedo performance analysis (without evasive maneuver and decoy case)

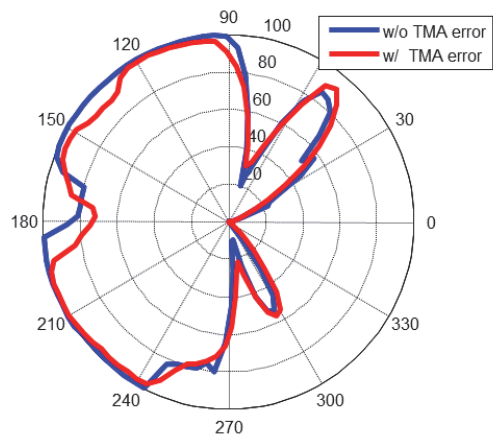


Fig. 6. torpedo performance analysis (with evasive maneuver and decoy case)

References

- DoD 5000.59 (1995), "Modeling and Simulation (M&S) Master plan"
- Kim, Taekyoo (2014) "System Operational Performance Analysis for Wire-Guided Torpedo" *Journal of the Korea Society for Simulation*, 23(2), 7-15.
(김태규. "선유도어뢰 체계운용성능분석 기법." 한국시뮬레이션학회논문지 23.2 (2014): 7-15.)
- Ku, B., Y. Lee, J. Park, S. Chung, W. Hong, W. Kim, M. Lim and H. Ko, "Robust ship wake search method in the target evasion environment," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol.12, No.1, 2009, 8-17.
(구본화, 이영현, 박정민, 정석문, 홍우영, 김우식, 임묘택, 고한석, "회피 기동에 강인한 수상 항적 탐색방법", 한국군사과학기술학회지, Vol.12, No.1,2009, 8-17)
- Mjedle, A. (1977) "A Homing Torpedo: The Effect of the Tactical Situation and the Torpedo Parameters on the Torpedo Effectiveness", *Master Thesis, Naval Postgraduate School (USA)*.
- Pak, J.M. (2008) "Effectiveness Analysis of an Acoustic Homing Torpedo", *Master Thesis, Korea University* (박정민. "음향 유도 어뢰의 효과도 분석." 석사학위논문, 고려대학교 (2008))
- Pak, Jung-Min, B. Ku, Y. Lee, D. Ryu, W. Hong, M. Lim, H. Ko. (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.
(박정민, 구본화, 이영현, 류동기, 홍우영, 고한석, 임묘택, "표적 회피기동과 어뢰음향대향체계를 고려한 경어뢰의 효과도 분석", 한국시뮬레이션학회 논문지, Vol.20, No.4, 2011, 1-11))
- Piplani, Lalit K., Joseph G. Mercer, and Richard O. Roop. "Systems Acquisition Manager's Guide for the Use of Models and Simulations", Report of the DSMC 1993-1994 Military Research Fellows. *Defense Systems Management College Press*, 1994.
- 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.)
- Shin, MyoungIn, 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. 한국시뮬레이션학회 논문지, 25 (3), 53-63.)
- Urick, R.J., Principles of underwater sound 3rd, MacGraw-Hill, 1983
- Lee, Simyong, S.Go (2016) "Constructive Simulation and Experimentation for Supporting Light Weight Torpedo Operational Tactics Study" *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, 19(6), 769-778
(이심용, 고승렬, 경어뢰 운용전술연구지원을 위한 구성시뮬레이션 및 모의실험 / 군사과학기술학회지 / 2016.12)
- Yoon, H, "A Study on the Detection Effectiveness of Torpedo", *Report of Agency for Defence Development*, NWS-519-960331, 1996
- Zarchan, Paul. Tactical and strategic missile guidance. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012.



조 현 진 (hijcho@webmail.korea.ac.kr)

2005 해군사관학교 정보통신공학과 학사

2009 Washington University in Saint Louis 전자시스템공학 석사

2016 고려대학교 전기전자전파공학과 박사

2016~ 현재 해군사관학교 전기전자공학과 조교수

관심분야 : 수중음향신호처리, 패턴인식, 무기체계 효과도 분석