

부유식 및 자항식 기만기의 혼합 운용을 고려한 수상함의 생존율에 대한 효과도 분석

신명인 · 조현진 · 이진호[†] · 임준석 · 이석진 · 김완진 · 김우식 · 홍우영

Effectiveness Analysis for Survival Probability of a Surface Warship Considering Static and Mobile Decoys

MyoungIn Shin · Hyunjin Cho · Jinho Lee[†] · Jun-Seok Lim · Seokjin Lee · Wan-Jin Kim · Woo Shik Kim · Wooyoung Hong

ABSTRACT

We consider simulation study combining static and mobile decoys for survivability of a surface warship against torpedo attack. It is assumed that an enemy torpedo is a passive acoustic homing torpedo and detects a target within its maximum target detection range and search beam angle by computing signal excess via passive sonar equation, and a warship conducts an evasive maneuvering with deploying static and mobile decoys simultaneously to counteract a torpedo attack. Suggesting the four different decoy deployment plans to achieve the best plan, we analyze an effectiveness for a warship's survival probability through Monte Carlo simulation, given a certain experimental environment. Furthermore, changing the speed and the source level of decoys, the maximum torpedo detection range of warship, and the maximum target detection range of torpedo, we observe the corresponding survival probabilities, which can provide the operational capabilities of an underwater defense system.

Keyword : Acoustic Homing Torpedo, Decoy, MOE(Measure of Effectiveness), Simulation

요약

본 연구는 어뢰공격에 대비한 수상함의 생존율 향상을 위해 자항식 기만기와 부유식 기만기를 혼합적으로 적용한 시물레이션을 고려한다. 적의 공격어뢰는 수동 음향 추적 어뢰로써 어뢰의 표적 탐지거리 및 빔폭 내에서 수동 소나 방정식에 의해 신호이득을 계산하여 표적을 탐지, 추적하며, 수상함은 회피기동과 함께 자항식 및 부유식 기만기를 운용하여 어뢰공격에 대응하는 것으로 가정한다. 효과적인 기만기 혼합 운용을 위해 4가지의 기만기 운용 방안을 제안하며, 각각의 경우에 대하여 설정된 실험 환경 내에서 몬테카를로 시물레이션을 통한 수상함의 생존율에 대한 효과도 분석을 수행하였다. 또한 기만기의 속도 및 음원 준위, 함정의 어뢰 탐지거리, 어뢰의 표적 탐지거리를 변수로 설정하고 변수값의 변화에 따른 생존율의 변화 추이를 관찰하여 구성요소의 운용 성능에 대한 참고자료를 제시하였다.

주요어: 음향 추적 어뢰, 기만기, 효과도 측도(MOE), 시물레이션

* 이 연구는 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다 (UE150021DD).

Received: 27 May 2016, **Revised**: 7 August 2016,
Accepted: 9 August 2016

† Corresponding Author: Jinho Lee
E-mail: jinholee@navy.ac.kr
Department of National Defense Management,
Korea Naval Academy, Jinhae, Korea

1. 서론

첨단 정보통신 및 과학 기술의 발전은 어뢰를 보다 고속화, 경량화가 가능하게 함으로써 그 위협이 날로 증가하고 있다. 또한 어뢰의 표적 추적방식도 다양화됨에 따라 어뢰 공격에 대응하기 위한 어뢰대항책 역시 많은 관심 속에 발전하고 있다. 그러나 수중에서 상대적으로 소

형이면서 고속으로 접근해 오는 어뢰에 대한 효과적인 탐지, 기만, 회피 등은 여전히 매우 제한적이라고 할 수 있다.

최근 어뢰의 개발 추세를 보면, 기존 음향 추적 어뢰(Acoustic Homing Torpedo)가 음향 기만기에 기만되는 단점을 보완하기 위하여 표적이 생성하는 항적을 추적하는 항적 추적 어뢰(Wake Homing Torpedo)가 개발되고 있다(Friedman, 1994; Ku et al., 2009; Lee et al., 2010). 또한 어뢰의 진행방향 앞쪽을 진공 상태로 만들어 어뢰의 속도가 급속히 증가되도록 하는 초공동어뢰(Supercavitating Torpedo)의 개발 또한 보고되고 있다(Alyanak, 2005). 이러한 어뢰의 개발은 수중에서의 효과적인 방어를 더욱 어렵게 하고 있으며, 이를 보완하기 위한 수중방어체계의 개념적, 기술적인 발전과 더불어 운용상의 전술적 개발 또한 함께 진행되고 있다.

어뢰를 탐지하기 위하여 수상함은 소나(SONAR)를 장착하고 있으며, 수동 및 능동 방식으로 음향을 탐지할 수 있다(Pak, 2008). 일반적으로 소나에 의해 어뢰로 추정되는 음향이 탐지될 경우, 수상함은 신속히 회피침로로 회피함과 동시에 기만기(Decoy)와 재머(Jammer)를 발사하여 어뢰가 수상함을 탐지하여 공격하는 것을 최대한 방해 또는 지연함으로써 위협으로부터 벗어나고자 한다(Hong and Kim, 2010). 이 때 기만기는 함정과 유사한 소음을 발생시킴으로써 어뢰가 기만기를 함정으로 오인하여 쫓아가도록 하는 기능을 하며, 재머는 특정 시간동안 광대역 소음을 발생하여 어뢰가 함정을 탐지하는 것을 방해하는 역할을 한다. 따라서 수상함의 입장에서 회피침로의 산출, 기만기 및 재머의 발사수와 발사방위를 설정하는 것은 수상함의 생존성을 높이는 가장 핵심적인 부분이라 할 수 있다. 이러한 전술적 운용방안은 기만기와 재머의 사양과 작동능력(예를 들어, 작동시간, 소음 준위 등)을 고려하여 설정되어야 한다.

M&S(Modeling and Simulation) 기법은 복잡한 하이브리드 시스템의 효과도를 분석하는데 널리 사용되고 있으며, 특히 수중방어체계의 전술적 개발을 위한 도구로 중요한 역할을 수행해 오고 있다(Shin, 2007). 시스템의 효과도 분석을 위해서는 먼저 해당 시스템의 성능을 평가하기에 적절한 측도(Measure)를 선정해야 하며, 어뢰의 효과도 분석에 통상 사용되는 MOE(Measure of Effectiveness: 효과도 측도)는 명중률이다. 표적함의 회피기동과 자항식 기만기를 고려한 음향 유도 어뢰의 효과도 분석(Pak, 2008), 표적함의 회피기동과 부유식 및 자항식 기만기, 재머를 동시에 고려한 상황에서 경어뢰의

효과도 분석(Pak et al., 2011), 이산사건 및 이산시간 시뮬레이션 모델을 고려한 음향 유도 어뢰의 효과도 분석(Ha et al., 2010; Ha et al., 2013), 선유도 어뢰의 운용성능 분석을 위한 연구(Kim, 2007) 등이 어뢰의 효과도 분석을 위해 M&S 기법을 적용한 대표적인 사례들이다.

어뢰의 공격을 효과적으로 방어하기 위한 방어체계의 효과도 분석에는 생존율이 MOE로 주로 사용되어 왔다. 수상함, 어뢰, 잠수함 및 기만기의 운용성능을 변수로 설정하여 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션을 적용함으로써 생존성이 가장 높은 변수를 도출한 사례가 있으며(Seo et al, 2010a), 부유식 기만기와 자항식 기만기의 효과적인 운용(Seo et al., 2010b), 기만기와 재머의 혼합 운용(Kwon et al., 2012; Zhan et al., 2011) 등을 위한 연구에도 적용되었다. 이처럼 M&S 기법은 어뢰의 효과도 뿐만 아니라 어뢰대항체계의 효과도 분석에도 널리 적용되어 왔으며, 이를 통해 어뢰가 발달함에 따라 어뢰대항체계 또한 경쟁적으로 개발되고 그 전술적 운용에 관한 연구가 진행되어 왔음을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 어뢰대항체계에 대한 효과적인 운용방안을 고려하며, 자항식 기만기와 부유식 기만기의 혼용방안에 대하여 시뮬레이션을 통한 효과도 분석을 수행한다. 자항식 기만기와 부유식 기만기의 혼용 사례는 기존 연구에서도 찾아볼 수 있으나(Table 1), 그 운용방안에 대한 고려사항과 시나리오가 제한적으로 적용되어 왔다. 따라서 본 논문은 크게 기존의 부유식 기만기만 사용하는 경우와 자항식 기만기를 혼용하는 경우, 그리고 기존 부유식 기만기에 자항식 기만기를 추가적으로 운용하는 경우를 비교 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 공격어뢰의 운동 및 탐지 모델을 제시하고 수상함의 운동 모델 및 기

Table 1. Cases of mobile decoys considered in the literature

Author(s)	Mobile decoys considered	Types that mobile decoys are fired
Hong and Kim (2010)	2 static decoys + 2 mobile decoys	i) 2 mobile in the front + 2 static in the rear
Hong et al. (2013)		ii) 2 mobile in the rear + 2 static in the front
Song (2010)	i) 1 mobile decoy ii) 2 mobile decoys	±30, ±60, ±90° from the initial maneuvering course of surface ship
Pak (2008)	4 static decoys + 1 mobile decoy	90° from the torpedo detecting direction
Pak et al. (2011)		

만기의 모델에 대하여 다룬다. 3장에서는 설정된 모델을 통한 시뮬레이션 절차와 방법을 제시하고 그 결과를 통한 효과적인 방어체계의 운용방안에 대해 고찰하며, 4장에서 본 연구의 결론과 함께 향후 연구방향을 제시한다.

2. 모델 구성 및 변수 설정

전반적인 모델 구조는 크게 (적)공격어뢰, 수상함(자함) 및 기만기의 3가지 체계로 구성되며, 각각의 모델에 대한 세부 구성요소 및 변수는 다음과 같다.

2.1 공격어뢰 모델

본 연구에서 고려하는 적의 공격어뢰는 수동 음향 추적 어뢰이다. 공격어뢰는 3차원 좌표 평면상 최초 (-2000m, -2000m, -50m)의 위치에서 발사되는 것으로 가정한다. 최초 발사단계에서 표적 기동 분석(TMA: Target Motion Analysis)을 통해 발사각을 계산하고 발사각 방향으로 어뢰를 발사한다. 발사각은 표적의 속도 및 진행 방향, 어뢰 속도를 이용하여 예상 요격지점을 기하학적인 방법으로 구한다(Pak, 2008). 또한 TMA를 실시하는데 있어 표적의 실제 위치와 어뢰가 표적의 위치라고 판단하는 위치 간에 오차를 확률적 요소로 고려하며, 그 오차가 $\pm 3^\circ$ 이내에서 균등분포(Uniform Distribution)를 따르도록 가정한다.

발사 후 표적을 탐색하는 단계에서 수동 음향 추적 어뢰는 설정된 빙폭(Sweep각) 범위 내에서 좌우로 사형 탐색을 실시하다가 표적을 탐지하면 호밍(Homing) 유도를 시작하며 직진 운동을 한다(Pak, 2008). 표적 탐지를 유지하면서 표적으로부터 일정 거리 이내에 진입할 경우(본 연구에서는 300yards로 설정) 최종 공격단계로 들어가며 어뢰의 속도를 증가하게 된다. 만약 표적 탐지 후 소실시에는 재탐색을 위해 원형 탐색을 실시한다(Pak, 2008).

공격어뢰의 표적 탐지 여부는 크게 3가지 조건에 따라 결정되는데, 빙폭과 최대 탐지거리, 그리고 수동 소나 방정식에 의한 SE(Signal Excess: 신호이득) 값이다. 최초 사형 탐색 중 빙폭 범위 내에 있는 표적 중 최대 탐지거리 내에 존재하는 표적에 대하여 식 (1)의 수동 소나 방정식(Pak, 2008)을 통해 SE를 구한다.

$$SE = SL - TL - NL - DI - DT \quad (1)$$

식 (1)에 나타나듯이 SE는 표적 탐지 여부를 판별하는 전체 값을 뜻하며, SE를 결정하는데 영향을 미치는

식 (1)의 우변항에 나타나는 값은 SL(Source Level), TL(Transmission Loss), NL(Noise Level), DI(Directivity Index) 및 DT(Detection Threshold)이다. SL은 음원 준위를 뜻하며 표적에서 발생하는 소음의 크기를 의미한다. TL은 음파의 전달 손실을 뜻하는 것으로

$$TL = 20\log R + \alpha R \times 10^{-3}$$

(R: 어뢰-표적간 거리, α : Attenuation Factor, f: 소나 사용 주파수)로서 계산되며,

$$\alpha = \frac{0.1f^2}{1+f^2} + \frac{40f^2}{4100+f^2} + 0.000275f^2 + 0.003$$

이다. NL은 자연 수중 소음과 어뢰 자체의 소음 등 음향신호를 탐지하는데 방해가 되는 소음의 준위로서

$$-17.14\log(f) + 52.643 + 10\log(B_w) \quad (2)$$

$$0.4 V_{TOR} - 2 \quad (3)$$

식 (2)는 자연 수중 소음, 식 (3)은 어뢰 자체 소음을 계산하는 식이며, B_w 는 밴드폭, V_{TOR} 은 어뢰 속도이다. DI는 빔의 방향성을 나타내는 지향 지수를 나타내며 식 (4)와 같이 계산한다.

$$DI = 40 - 10\log(\Delta\theta\Delta\phi) \quad (4)$$

여기서 $\Delta\theta$, $\Delta\phi$ 는 각각 수평, 수직 방향의 빙폭을 의미하며 본 연구에서는 둘 다 30° 로 설정하였다. 마지막으로 DT는 탐지 임계치로서 음향 신호의 탐지 여부를 판단하는 기준이다. 본 연구에서는 어뢰 최대 탐지거리만을 고려해 탐지 임계치를 계산하였으며, 표적의 180° 방위에 어뢰가 위치하고 어뢰와 표적의 거리가 어뢰의 최대 탐지거리와 같을 때의 SE를 계산하여 DT로 설정하였다. 식 (1)의 수동 소나 방정식에 의해 SE의 값이 0보다 크면 표적이 탐지된 것으로 간주하는데, SE가 0보다 크다는 것은 표적이 발생시키는 음원의 크기가 전달 손실, 소음, 지향 지수에 의해 줄어들게 되는데 그 값이 탐지 임계치보다 크게 되면 탐지되는 것을 의미한다. 따라서 수동 음향 추적 어뢰는 빙폭 범위 및 표적 최대 탐지거리 이내에 존재하는 표적에 대하여 식 (1)을 통한

SE가 0보다 큰 표적을 향해 직진하여 추적하게 된다. 만약 빔폭 및 최대 탐지거리 이내에 다수의 표적이 존재하게 될 경우 SE값이 가장 큰 표적을 향해 나아가도록 설정하였다. Fig. 1은 공격어뢰의 운동 및 탐지 모델을 시뮬레이션으로 알고리즘화한 절차이다.

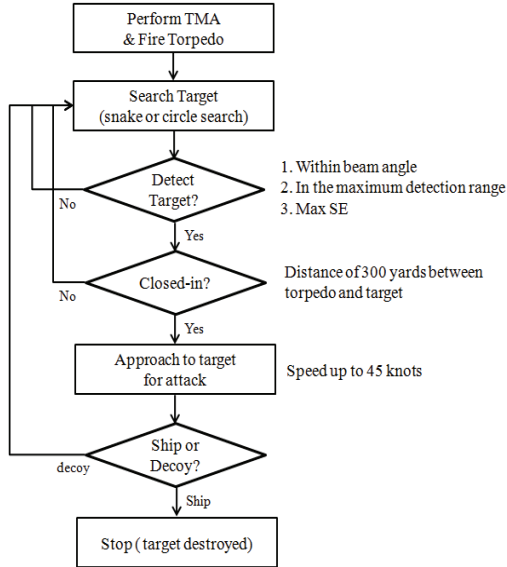


Fig. 1. Moving and detection mechanism for a torpedo

적 공격어뢰의 모델 중 시뮬레이션 수행시 포함되는 확률적 요소는 표적 위치 추정 오차로 발생하는 발사각이며, 어뢰의 최대 표적 탐지거리를 변경하였을 경우의 효과도를 분석해 본다.

2.2 수상함(자함) 운동 모델

수상함은 대잠능력을 갖추고 있는 구축함을 기준으로 하였으며, 최초 (0m, 0m, 0m)의 위치에서 X축의 방향으로 25knots의 속력으로 진행하는 것으로 모사한다. 수상함의 어뢰 정보 거리 이내에 어뢰가 나타나면 어뢰를 탐지하는 것으로 가정하며, 어뢰 탐지와 함께 회피기동을 실시하고 동시에 기만기를 발사하도록 한다. 회피기동 방향과 기만기 발사 위치는 어뢰음향대향체계에 따라 작동하는 것으로 가정하며(Pak et al., 2011), 전반적인 수상함의 대응 상황은 Fig. 2에 묘사된 바와 같다. 또한 해상에서 항해중인 선박이 침로를 변경할 경우 나타나는 종거, 횡거, 전술 회전경 및 최종 회전경을 실제 운동 모델에 반영하도록 한다(Ku et al., 2009). 수상함이 발생시키는 소음 준위(Source Level)는 구축함 급을 기준으로 114dB로 설정하였다(Urick, 1983). 수상함의 어뢰 정보

Table 2. Parameters for simulation

Platform	Parameter	Value
(Enemy) Torpedo	Initial location	(-2000, -2000, -50)
	Speed	35/45knots
	Search beam angle	±30°
	Maximum target detection range	1500~3000m (interval: 500m)
	Search pattern	Snake, Circle
	Error on firing angle	±3°
(Friendly) Surface Warship	Initial location	(0, 0, 0)
	Speed	25knots
	Maximum torpedo detection range	1500, 2500m
	Source level	114dB
Decoy	Operating duration	180 seconds
	Speed (mobile decoy)	12, 18, 24knots
	Source level	140, 150, 160dB
	Deployment plan	4 plans

거리를 1500m, 2500m로 변경함에 따른 수상함의 회피 성공률(즉, 생존율)을 관찰해 보도록 한다.

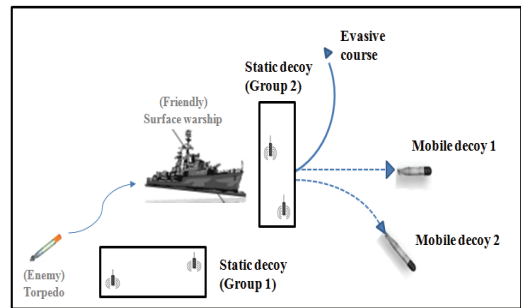


Fig. 2. Evasive maneuvering of a surface warship with decoys deployment

2.3 기만기 모델

수상함에서 발사되는 부유식 기만기는 총 4기를 사용하는 것으로 가정하며, 부유식 기만기의 발사 위치는 Fig. 2에서 나타나듯이 적 어뢰의 접근 방향으로 2기(그룹 1), 접근 반대방향으로 2기(그룹 2)를 발사하는 것으로 가정한다. 또한 본 연구에서 고려하는 자항식 기만기는 2기를 사용하도록 모델을 구성하였고, 그룹 1의 부유식 기만기 2기를 자항식 기만기 2기로 대체하는 경우, 그룹 2의 부유식 기만기 2기를 자항식 기만기 2기로 대체하는 경우로 구분하여 시뮬레이션 모델에 반영하였다. 추가적으로, 현재의 부유식 기만기 4기 발사에 추가하여 자항식 기만

기 2기를 발사하는 경우와도 비교해 본다. 자항식 기만기의 발사 방위는 수상함의 원침로 방위와 회피침로의 180° 방위로 각각 진행하도록 한다. 이를 바탕으로 본 논문에서 고려하고자 하는 기만기 운용 방안을 정리하면 다음과 같다.

- Plan 1. 부유식 기만기 4기
- Plan 2. 부유식 기만기 2기(그룹 1),
자항식 기만기 2기
- Plan 3. 부유식 기만기 2기(그룹 2),
자항식 기만기 2기
- Plan 4. 부유식 기만기 4기(그룹 1 + 그룹 2),
자항식 기만기 2기

기만기의 작동 지속시간에 대해서는 고정된 수치를 적용하고 자항식 기만기의 속도 및 SL (음원 준위)에 따른 회피성공률을 관찰하기 위하여 속도 및 SL 을 변화시켜 가며 시뮬레이션을 수행한다. 자항식 기만기의 운동 모델은 공격어뢰의 운동 모델과 동일하게 모사하되 설정된 속도로 작동 지속시간 동안 직진 기동을 하도록 하며, 부유식 기만기는 투하된 위치에 고정되어 작동 지속시간 동안 소음을 발생시키도록 구현하였다.

지금까지 적 공격어뢰, 수상함 및 기만기에 대한 모델의 구성요소를 알아보았으며, 변수값 및 범위는 기존 연구(Hong et al, 2013; Pak, 2008)를 바탕으로 설정하였으며 Table 2에서 요약하여 제시한다. 각 구성요소의 운동 모델 및 탐지 방식에 따라 기동하게 되며, 지정된 변수값의 변화와 기만기 운용 방식에 따른 반복 시뮬레이션을 통해 함정의 회피성공률을 도출해 보도록 한다.

3. 시뮬레이션 실행 및 결과 분석

함정의 생존율에 대한 효과도 분석 시뮬레이션은 최초 어뢰 및 수상함의 위치에서 시작한다. Time 0일 때 수상함은 X 축 방향으로 25knots의 속력으로 기동중인 상태로, 어뢰는 TMA 실시 후 계산된 발사각으로 발사되는 것으로부터 출발한다. 이 때 발사각 계산으로부터 나오는 오차에 의해 어뢰의 최초 기동방향이 동일한 실험 환경 하에서도 달라질 수 있으므로 반복적인 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션을 통한 평균 회피 성공률을 구하도록 한다. 이 후 이산 시간 단위로 수상함 및 어뢰의 위치가 업데이트되도록 하며, 어뢰는 사형 탐색을 실시하다가 빔폭, 표적 최대 탐지거리내에 표적이 들어올

경우 해당 표적에 대하여 SE 를 계산하게 되며, 다수 표적이 있을 경우에는 SE 값이 최대인 표적을 향해 직진 기동을 하게 된다. 수상함은 최초 기동 방향 및 속력으로 직진 기동을 하다가 어뢰 최대탐지거리 이내에 어뢰가 들어올 경우 어뢰음향대향체계에서 제공하는 회피침로로 회피기동을 함과 동시에 기만기 운용 방안에 따라 4가지 중 지정된 1가지의 방법으로 기만기를 발사한다. 어뢰가 최종적으로 기만에서 벗어나 수상함을 추적하여 공격에 성공하면 수상함의 생존은 실패한 것으로 하며, 기만기의 기만에 의해 어뢰 작동시간이 종료될 때까지 기만기 주변 배회 또는 자항식 기만기로 추적함으로써 수상함의 격침에 실패할 경우 수상함의 생존은 성공한 것으로 판단한다. 각각의 고정된 변수값과 기만기 운용 방안 하에서 동일한 시뮬레이션을 500번 반복 수행하여 $(1/500) \times$ (수상함 생존 횟수)로 평균 회피 성공률을 도출하였다. 변수와 기만기 운용 방안의 조합은 (어뢰의 표적 최대탐지거리 4가지) \times (수상함의 어뢰 최대탐지거리 2가지) \times (기만기의 SL 3가지) \times (자항식 기만기의 속도 3가지 \times 기만기 운용 방안 3가지 + 기만기 운용 방안 1가지) = 240가지의 경우의 수가 발생하게 되며, 각각의 경우에 대하여 500번 반복 실험을 수행하였다. 시뮬레이션은 MATLAB 프로그램을 이용하였으며, 그 결과는 Table 3에서 나타나는 바와 같다.

실험 결과를 통해, 전반적으로 부유식 기만기 4기만을 적용한 Plan 1에 비해 부유식과 자항식 기만기를 함께 사용하는 Plan 2, 3, 4가 더 높은 생존율을 보장하므로 두 종류의 기만기를 혼용하는 것이 더욱 효과적임을 알 수 있다. 다만 자항식 기만기의 속도가 12knots인 경우에는 어뢰의 표적 탐지거리가 함정의 어뢰 탐지거리보다 더 클수록 오히려 부유식 기만기만을 사용한 Plan 1이 다른 Plan보다 높은 생존율을 보여주고 있으므로 자항식 기만기를 혼용하는 것이 더욱 높은 효과도를 갖기 위해서는 기만기의 속도가 더 빠르거나 함정의 어뢰 탐지거리가 더 증가될 필요가 있다. 다음으로, 4가지의 Plan 중 평균적으로 가장 높은 생존율을 보여주는 기만기 운용 방안은 Plan 3임을 알 수 있다. 이를 통해 만약 기존의 부유식 4기 중 2기를 자항식 기만기로 대체한다면 어뢰가 접근해오는 방향으로 발사하는 부유식 기만기 2기를 자항식 기만기로 대체하는 것이 본 연구의 실험 환경 하에서는 가장 효과적인 운용 방법이라고 할 수 있을 것이다. 또한 Plan 4의 경우는 Plan 1의 부유식 기만기 4기를 그대로 사용하고 추가적으로 자항식 기만기 2기를 사용한 기만기 운용 방안인데, 함정의 어뢰 탐지거리가 1500m이며

Table 3. The simulation results for survival probabilities of a surface warship when the source level of a decoy is 150 dB.

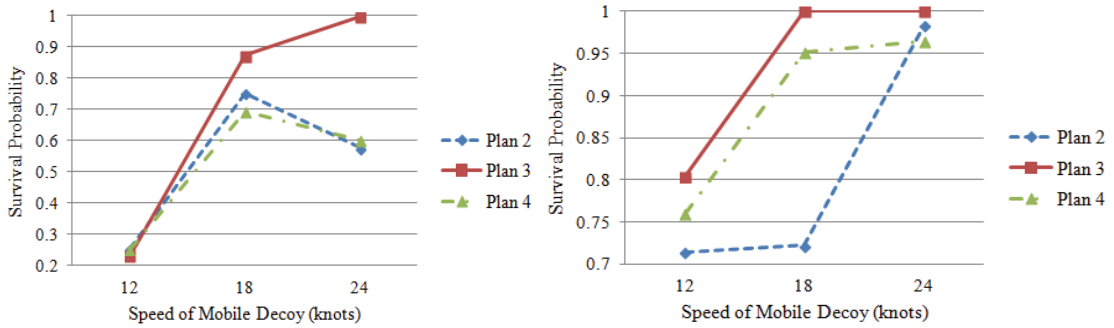
Decoy Deployment Plan	Mobile Decoy Speed (knots)	Warship's Maximum Torpedo Detection Range (meter)	Torpedo's Maximum Target Detection Range (meter)				Average
			1500	2000	2500	3000	
Plan 1	-	1500	0.450	0.248	0.204	0.076	0.245
		2500	1.000	0.414	0.036	0.032	0.371
Plan 2	12	1500	0.566	0.176	0.138	0.142	0.256
		2500	1.000	0.870	0.738	0.248	0.714
	18	1500	0.934	0.778	0.692	0.604	0.752
		2500	1.000	1.000	0.460	0.426	0.722
	24	1500	0.994	0.458	0.448	0.414	0.579
		2500	1.000	1.000	0.992	0.940	0.983
Plan 3	12	1500	0.536	0.174	0.170	0.050	0.233
		2500	1.000	1.000	0.924	0.292	0.804
	18	1500	1.000	0.990	0.914	0.586	0.873
		2500	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	24	1500	1.000	1.000	1.000	0.986	0.997
		2500	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Plan 4	12	1500	0.514	0.194	0.190	0.114	0.253
		2500	1.000	0.950	0.784	0.306	0.760
	18	1500	0.890	0.734	0.660	0.482	0.692
		2500	1.000	1.000	0.954	0.854	0.952
	24	1500	0.984	0.542	0.514	0.360	0.600
		2500	1.000	0.966	0.952	0.936	0.964
Average			0.893	0.725	0.639	0.492	-

자항식 기만기의 속도 12knots인 경우를 제외하고는 Plan 3과 비교했을 때 효과도가 낮은 것으로 나타난다. 따라서 함정의 어뢰 탐지능력이 좋지 않거나 기만기의 속력이 저속인 경우가 아니라면 굳이 부유식 4기와 자항식 2기(총 6기)를 사용하는 Plan 4보다 부유식 2기와 자항식 2기(총 4기)를 사용하는 Plan 3이 더 효과적이라고 할 수 있다.

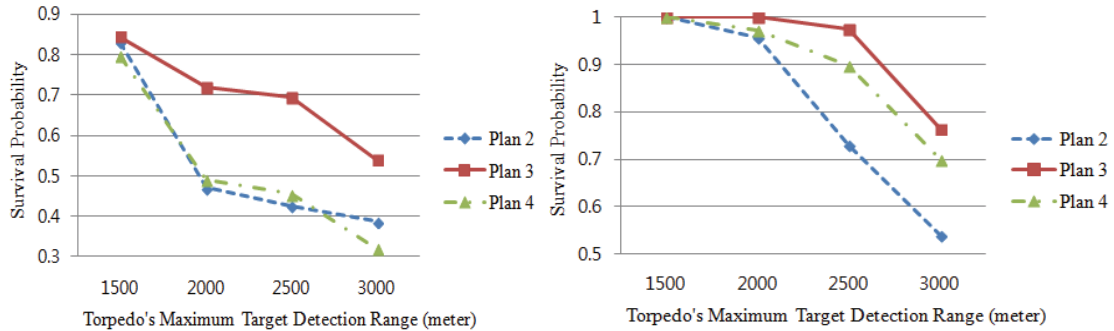
자항식 기만기의 속도가 함정의 생존율에 미치는 영향을 알아보기 위하여 Plan 2, 3, 4에서 구한 평균 생존율을 속도별로 비교해 보았고 그 결과는 Fig. 3. (a), (b)와 같다. 먼저 함정의 어뢰 탐지거리가 1500m일 때, 자항식 기만기의 속도가 증가함에 따라 함정의 평균 생존율이 Plan 3인 경우에만 지속적으로 증가하고 Plan 2, 4인 경우에는 18knots보다 클 경우 오히려 감소하는 현상이 발생하였다. 이는 어뢰의 발사각, 속도 또는 함정의 어뢰 탐지 및 회피시점 등 복합적인 요소를 고려할 필요가 있으며 이 현상만으로 기만기 속도가 일정 수준 이상 증가할

경우 함정의 생존율이 떨어진다고 단정하기에는 매우 제한적이다. 함정의 어뢰 탐지거리가 2500m일 경우에는 자항식 기만기의 속도가 증가함에 따라 평균 생존율이 함께 증가함을 알 수 있다. 평균 생존율이 아닌 어뢰의 표적 탐지거리대별 생존율을 Table 3에서 확인해 보면 Plan 3을 제외한 나머지는 대부분 자항식 기만기의 속도가 18knots에서 24knots로 증가함에 따라 생존율이 감소하였다. 이는 자항식 기만기의 속도가 너무 높으면 어뢰가 자항식 기만기에 유인되기 전에 이미 너무 멀리 벗어나서 오히려 자항식 기만기의 기만 효과를 크게 얻지 못하는 것으로 판단된다. 한편 자항식 기만기의 속도별로 비교해 본 결과에도 여전히 Plan 3이 가장 효과적임을 다시 한번 확인할 수 있다.

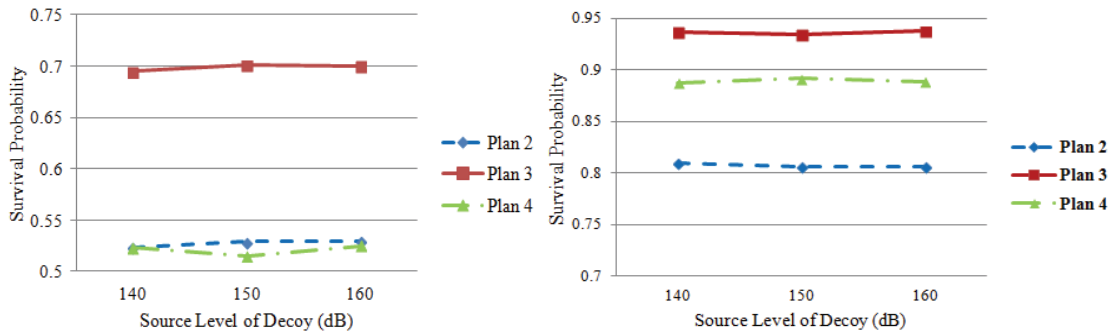
어뢰의 표적 탐지능력에 따른 함정의 생존율의 변화를 살펴보면, 어뢰의 표적 탐지거리가 증가할수록 함정의 평균 생존율이 낮아짐을 알 수 있는데 이는 직관적으로도 충분히 예상할 수 있는 바이다. 구체적으로 기만기 운용



(a) Warship's maximum torpedo detection range = 1500m (b) Warship's maximum torpedo detection range = 2500m



(c) Warship's maximum torpedo detection range = 1500m (d) Warship's maximum torpedo detection range = 2500m



(e) Warship's maximum torpedo detection range = 1500m (f) Warship's maximum torpedo detection range = 2500m

Fig. 3. Average survival probabilities depending on the speed of mobile decoy, torpedo's maximum target detection range, and the source level of decoy

방안 및 함정의 어뢰 탐지거리에 따른 영향을 Fig. 3. (c) 및 (d)에 나타내었고, Plan 4의 경우에 어뢰의 표적 탐지 거리 증가에 따른 생존율의 감소폭이 가장 크게 나타났다. 특히 함정의 어뢰 탐지거리가 1500m인 Fig. 3. (c)의 경우를 보면 Plan 3을 제외하고는 모두 어뢰의 표적 탐지거리가 2000m 이상일 때 생존율이 50% 미만의 결과를 보인다. 그리고 상대적으로 함정의 어뢰 탐지능력이 떨어질수록 표적의 함정 탐지능력 증가에 따른 함정 생존율은 매우 낮음을 알 수 있으며, 여전히 Plan 3이 가장 효과

적인 기만기 운용 방안임을 확인할 수 있다.

마지막으로 기만기의 SL(음원 준위)에 따른 영향을 알아보기 위하여 SL을 현재의 150dB에서 각각 ± 10 dB를 변경한 140dB 및 160dB로 설정하고 지금까지와 동일한 실험을 진행하였다. SL의 범위를 이와 같이 설정한 이유는 일반적으로 기만기의 소음이 표적에 비해 30-40dB 높게 운용하기 때문이다(Pak, 2008). Fig. 3. (e), (f)가 기만기의 SL 변화에 따른 평균 함정의 생존율에 대한 값을 나타낸 그래프이다. 실험 결과에서 나타나

는 바와 같이 SL 이 생존율에 미치는 영향은 크지 않으며, 기만기 운용 방식에 따라 함정의 생존율이 크게 영향을 받음을 보여 준다. 특히 함정의 어뢰 탐지거리가 1500m인 Fig. 3. (e)를 보면 Plan 3인 경우에는 대략 70% 정도 보장되는 반면 Plan 2, 4는 50% 남짓의 확률을 보인다. 함정의 어뢰 탐지거리가 증가한 Fig. 3. (f)의 경우에 생존율이 전반적으로 높게 나타나며 그 중에 Plan 3만이 유일하게 90% 이상의 확률을 보장하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는 수동 음향 추적 어뢰 공격에 대하여 함정의 생존율을 높이기 위한 효과적인 대응 방안에 대하여 논의하였다. 함정의 수중방어시스템을 크게 회피기동과 기만기 발사로 구분하여 접근하였으며, 기만기는 자항식 기만기와 부유식 기만기를 고려하였다. 자항식 및 부유식의 적절한 조합을 통해 함정의 생존율을 높일 수 있는 운용 방식에 대한 시뮬레이션을 수행함으로써 주어진 실험 환경 내에서 최상의 기만기 운용 계획을 수립하였다. 본 연구 결과에 따르면 부유식 기만기만을 사용하는 것보다 자항식 기만기와 혼용하는 것이 더욱 높은 함정의 생존율을 가져다주었으며, 자항식 기만기의 속도와 공격어뢰의 표적 탐지능력에 따라 함정의 생존율이 영향을 받음을 확인하였다. 이러한 결과는 수상함 및 기만기의 운용상 요구 성능에 대한 참고자료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 제시한 결과에도 불구하고, 다음의 몇 가지에 대한 제한사항을 언급할 필요가 있다. 먼저, 최근 다양한 형태의 어뢰가 세계 각국에서 개발 또는 운용중임을 감안할 때 향후 연구에서는 보다 다양한 종류의 어뢰에 대한 추가적인 효과도 분석이 필요할 것이다. 특히 항적 추적 어뢰의 경우 탐지 모델 수립 및 그에 대한 회피 또는 기만의 형태 등 다방면의 연구가 진행되어야 할 것이다. 다음으로 자항식 기만기와 부유식 기만기의 운용 조합을 더욱 다양화할 필요가 있으며 사양에 대한 변수 폭을 더욱 넓혀서 실험을 할 필요가 있다. 마지막으로 공격어뢰의 종류를 사전에 알 수 없는 것이 일반적인 상황을 고려할 때 회피기동의 형태 및 기만기의 조합 등을 더욱 다양화하여 다양한 종류의 어뢰공격에 강건한 (Robust) 대응 방안을 찾기 위한 연구 또한 필요할 것이다. 또한 적 어뢰에 관한 정보(발사각 및 발사각오차에 따른 기동방향)와 같은 불확실성을 내포한 상황에서 반

복적인 실험 결과에 대한 평균을 통해 방안을 찾는 가장 대표적인 방법이 바로 시뮬레이션이라는 점에서 매우 의미 있는 연구라고 판단된다. 본 연구에서 다루지 못한 이러한 부분에 대해서는 향후 연구과제로 남겨두고자 한다.

References

- Alyanak, E., V. Venkayya, R. Grandhi and P. Penmetsa, "Structural response and optimization of a supercavitating torpedo," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.41, No.6, 2005, 563-582.
- Friedman, N., *Start Worrying about Wake Homing Torpedoes*, Preceding, Naval Institute, 1994, 123-124.
- Ha, S., J.H. Cha and K.Y. Lee, "Analysis of detecting effectiveness of a homing torpedo using combinatorial discrete event & discrete time simulation model architecture," *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol.19, No.2, 2010, 17-28.
- (하술, 차주환, 이규열, "이산 사건/이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델 구조를 사용한 유도 어뢰의 탐지 효과도 분석", *한국시뮬레이션학회 논문지*, Vol.19, No.2, 2010, 17-28).
- Ha, S., N. Ku, K.-Y. Lee and M.-I. Roh, "Development of battle space model based on combined discrete event and discrete time simulation model architecture for underwater warfare simulation," *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol.22, No.2, 2013, 11-19.
- (하술, 구남국, 이규열, 노명일, "수중운동체 교전 시뮬레이션을 위한 이산 사건 및 이산 시간 혼합형 시뮬레이션 모델 구조 기반의 전투 공간 모델 개발", *한국시뮬레이션학회 논문지*, Vol.22, No.2, 2013, 11-19).
- Hong, J.H. and T.G. Kim, "Interoperation between engineering- and engagement-level models for system effectiveness analysis," *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol. 19, No. 4, 2010, 319-326.
- (홍정희, 김탁곤, "체계 효과도 분석을 위한 공학/교전 모델 연동 시뮬레이션 기술 연구", *한국시뮬레이션학회 논문지*, Vol.19, No.4, 2010, 319-326).

- Hong, J.H., K.-M. Seo and T.G. Kim, "Simulation-based optimization for design parameter exploration in hybrid system: a defense system example," *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, Vol.89, No.3, 2013, 362-380.
- Kim, T., "System operational performance analysis for wire-guided torpedo," *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol.23, No.2, 2014, 7-15.
(김태규, "선유도어뢰 체계운용성능분석 기법", *한국시뮬레이션학회 논문지*, Vol.23, No.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.
(구분화, 이영현, 박정민, 정석문, 홍우영, 김우식, 임묘택, 고한석, "회피 기동에 강인한 수상 항적 탐색 방법", *한국군사과학기술학회지*, Vol.12, No.1, 2009, 8-17).
- Kwon, S.J., K.-M. Seo, B.-S. Kim and T.G. Kim, "Effectiveness analysis of anti-torpedo warfare simulation for evaluating mix strategies of decoys and jammers," *Advanced Methods, Techniques, and Applications in Modeling and Simulation*, Springer Japan, 2012, 385-393.
- Lee, Y.-H., B.-H. Ku, S.-M. Chung, W.-Y. Hong and H.-S. Ko, "Robust search method for ship wake using two wake sensors," *Journal of the Acoustical Society of Korea*, Vol.29, No.3, 2010, 155-164.
(이영현, 구분화, 정석문, 홍우영, 고한석, "두 개의 항적 센서를 이용한 수상 항적 탐색 방법", *한국음향학회지*, Vol.29, No.3, 2010, 155-164).
- 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, "표적 회피기동과 어뢰음향대항체계를 고려한 경어뢰의 효과도 분석", *한국시뮬레이션학회 논문지*, Vol.20, No.4, 2011, 1-11).
- Seo, K.M., J.H. Hong and T.G. Kim, "DEVS-based underwater warfare simulation development for effectiveness analysis," *Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference*, Ottawa, Canada, 2010a.
- Seo, K.M., H.S. Song, S.J. Kwon and T.G. Kim, "Measurement of effectiveness for an anti-torpedo combat system using a discrete event systems specification-based underwater warfare simulator," *Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, Vol.8, No.3, 2010b, 157-171.
- Shin, J.-H., "On the development of authoritative representations of torpedo systems for engagement level simulation," *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol.16, No.4, 2007, 19-28.
(신지환, "교전수준 어뢰체계 표준모델 개발 방안 연구", *한국시뮬레이션학회 논문지*, Vol.16, No.3, 2007, 19-28).
- Song, Y.J., *Anti-SONAR Effectiveness Criterion and Circumstance Modeling for Performance Evaluation of Acoustic Counter Measure*, Master Thesis, Seoul National University, 2010.
(송윤중, "음향대항체계의 성능평가를 위한 소나기만 성능척도와 평가환경 모델링", 석사학위논문, 서울대학교, 2010).
- Urick, R.J., *Principles of Underwater Sound*, 3rd Edition, MacGraw-Hill, 1983.
- Zhan, K., B. Yu and J. Wang, "Simulations of the anti-torpedo tactic of the conventional submarine using decoys and jammers," *Applied Mechanics and Materials*, Vol.65, 2011, 165-168.



신명인 (myoungin@navy.ac.kr)

2010 고려대학교 학사, 수학
2013 고려대학교 석사, 응용수학
2013~ 현재 해군사관학교 수학과 수학교관
2015~ 현재 해군사관학교 수학과 조교수

관심분야 : Hyperbolic Conservation Laws, Central Upwind Scheme, Kalman Filter,



조현진 (hihjcho@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: 수중음향신호처리, 패턴인식



이진호 (jinholee@navy.ac.kr)

2002 해군사관학교 전기공학 학사
2006 연세대학교 산업공학 석사
2012 University of Texas at Austin 경영과학 박사
2012~ 현재 해군사관학교 국방경영학과 교수

관심분야 : 확률적 최적화, 시뮬레이션, 네트워크 최적화



임준석 (jslim@sejong.ac.kr)

1986년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업.
1988년 서울대학교 전자공학과 석사 졸업.
1996년 서울대학교 전자공학과 박사 졸업.
1996년 7월~1997년 10월 LG종합기술원
1998년 3월~ 현재 세종대학교 전자정보통신공학과 교수
관심분야 : 신호처리



이석진 (sjlee6@kgu.ac.kr)

2006 서울대학교 전기컴퓨터공학부 학사
2008 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사
2012 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
2012~ 2014 (주)LG전자 CTO연구소 선임연구원
2014~ 현재 경기대학교 공과대학 조교수

관심분야 : 음향신호처리, 배열신호처리, 음원분리



김 완 진 (kimwj@add.re.kr)

2005 부산대학교 전자전기통신공학부 공학사
2007 부산대학교 전자공학과 공학석사
2011 부산대학교 전자공학과 공학박사
2011~ 현재 국방과학연구소 선임연구원

관심분야 : 적응신호처리, 레이더 및 소나시스템, 디지털 통신



김 우 식 (wskim@add.re.kr)

1991 한국외국어대학교 물리학과 이학사
1993 한국외국어대학교 물리학과 이학석사
2005 한국해양대학교 해양공학과 공학박사
1993~ 현재 국방과학연구소 책임연구원

관심분야 : 수중음향, 음향신호처리, 소나시스템



홍 우 영 (wyhong@sejong.ac.kr)

1982 해군사관학교 전자공학과 학사
1985 연세대학교 전자공학과 석사
1991 미국 University of Minnesota 전기공학과 박사
1985~2013 해군사관학교 교수
1997~2000 미국 해군사관학교 교환교수
2013~ 현재 세종대학교 국방시스템공학과 교수

관심분야 : 수중음향 신호처리, 무기체계 효과도 분석