표적 회피기동과 어뢰음향대항체계를 고려한 경어뢰의 효과도 분석

박정민¹ · 구본화¹ · 이영현¹ · 류동기² · 홍우영³ · 고한석¹ · 임묘택^{1†}

Effectiveness Analysis for a Lightweight Torpedo Considering Evasive Maneuvering and TACM of a Target

Jung-Min Pak · Bon-Hwa Ku · Young-Hyun Lee · Dong-Gi Ryu · Woo-Young Hong ·
Han-Seok Ko · Myo-Taeg Lim

ABSTRACT

In the development phase of a torpedo, the effectiveness analysis is carried out to predict the performance and to learn how to use the torpedo. In order to obtain reliable data, it is required to model the tactical situation closely to the actual one. Because the submarine is a target of a lightweight torpedo, the anti-torpedo countermeasures of a submarine such as evasive maneuvering and TACM (Torpedo Acoustic Counter Measure) should be modeled in detail. In this paper, the evasive maneuvering is modeled reflecting the movement characteristics of the submarine. Furthermore various TACMs such as a floating-type decoy, a self-propelled decoy and jammers are also modeled. Then, effectiveness of a lightweight torpedo is measured and analyzed using the simulation program which is developed through the above modeling procedure.

Key words : Lightweight Torpedo, Effectiveness Analysis, Evasive Maneuvering, TACM, Monte-Carlo Simulation

요 약

어뢰 개발 단계에서는 어뢰의 성능 예측과 운용 방법 습득을 위해 효과도 분석이 실시되고 있다. 이 때 신뢰성 있는 데이터를 획득하기 위해서는 전술 상황을 실제에 가깝게 모델링한 시뮬레이션 프로그램이 필요하다. 경어뢰의 경우 잠수함을 주요 표적으로 삼고 있는데, 잠수함의 어뢰 대항 수단인 회피 기동이나 어뢰음향대항체계(TACM)를 상세히 모델링해야 신뢰성 있는 효과도 분석 결과를 획득할 수 있다. 본 논문에서는 잠수함의 운동 특성을 반영하여 회피기동을 모델링하였으며 부유식 기만기, 자항식 기만기, 재머(jammer) 등 다양한 음향대항체계를 고려하여 잠수함 표적을 모델링하였다. 그리고 이러한 모델링을 통해 개발한 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 경어뢰의 효과도를 측정하고 분석하였다.

주요어 : 경어뢰, 효과도 분석, 회피기동, 어뢰음향대항체계, 몬테카를로 시뮬레이션

1. 서 론

일반적으로 어뢰를 개발할 때는 개발할 어뢰의 제원을 결정하거나 어뢰 운용 방법을 습득하기 위해 사전에 효과

도 분석을 실시한다. 여기서 효과도(Effectiveness)란 특정 체계(System)의 임무가 시작되는 시점에서 정상 작동할 확률인 ‘가용도’, 임무 시작 시점에서 종료시점까지 정상 작동할 확률인 ‘의존도’, 임무의 목표를 달성할 확률인 ‘성능 발휘도’가 결합되어 정량적으로 산출되어지는 양이며, 체계의 성능을 나타내는 지표 역할을 한다. 이러한 효과도를 정확하게 신뢰성 있게 측정하기 위해서는 어뢰의 상세한 특성까지 파악하여 이를 반영해야 하지만, 개발 완료 전 연구 단계에서는 상세한 특성까지 알기는 어려우므로 단순하면서도 신뢰성 있는 효과도 측정 방법이 필요하다. 따라서 제한된 범위 내의 기술적인 특징과 작동 기

접수일(2010년 10월 15일), 심사일(1차 : 2011년 11월 8일),
게재 확정일(2011년 11월 10일)

¹⁾ 고려대학교 전기전자전파공학과

²⁾ 국방기술품질원

³⁾ 해군사관학교 전기전자공학과

주 저 자 : 박정민

교신저자 : 임묘택

E-mail: mlim@korea.ac.kr

능, 운용 상황 등을 단순하게 모델링하고 경험적으로 증명된 근사식을 이용하여, 반복적인 시뮬레이션을 실시하여 얻은 데이터를 토대로 효과도를 분석하는 방법이 많이 사용되고 있다(고용석, 1994). 이처럼 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 효과도를 측정하는 것은 실제 하드웨어를 사용한 성능 시험이 매우 위험하거나 막대한 비용이 소요되는 어뢰, 미사일 등의 무기 체계에 효율성이 높다. 또한 효과도 분석을 위해 개발한 시뮬레이션 프로그램은 무기 체계의 운용 전술 개발에도 사용되므로 이러한 점에 효과도 분석의 의의가 있다. A. Mjelde(1977), 윤현균(1996), 허성필(1996), 박정민(2007) 등은 능동 음향 탐지 방식을 사용하는 어뢰에 대해 전술 변수 및 성능 변수들이 어뢰의 탐지 확률에 미치는 영향을 분석하였다. 그러나 어뢰의 종류(중어뢰/경어뢰)와 표적의 종류(수상함/수중함)를 명확하게 지정하지 않아 전술 상황이 불분명하고 어뢰와 표적이 동일 평면에 존재한다는 가정 하에 음향 모델 및 운동 모델을 2차원으로 축소시켜 사용함으로써 실제 3차원 공간에서의 특성을 정확히 반영하지 못하였다. 김찬기(2001), 신지환(2007) 등은 3차원 수중 환경을 고려하여 경어뢰의 나선형 및 원형 탐색 방법의 효과도를 분석하였으나 잠수함 표적이 일정한 심도에서 직진만 하는 것을 가정하여 잠수함의 회피기동이나 어뢰음향대향체계(TACM : Torpedo Acoustic Counter Measure)의 영향이 반영되지 않았다는 단점이 있다.

본 논문에서는 경어뢰의 신뢰성 있는 효과도 측정을 위해 수중의 3차원 공간 특성을 반영하여 어뢰의 운동 모델과 음향 탐지 모델을 설정하였고, 표적이 되는 잠수함의 회피기동과 어뢰음향대향체계 등도 고려하여 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 효과도 측정 지수로는 표적 격침 확률을 사용하였으며 반복 시뮬레이션에 의한 몬테카를로 기법으로 확률을 계산하였다. 시뮬레이션 시 어뢰 교전 시나리오를 천해와 심해, 2가지로 구분하였으며 각 시나리오에서 표적 격침 확률을 계산하고 경어뢰의 투하 위치와 잠수함의 어뢰음향대향체계 등이 표적 격침 확률에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 분석 결과는 경어뢰 개발에 필요한 사전 특성 조사 자료 및 경어뢰 운용 전술 개발을 위한 참고 자료로 사용될 수 있다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 어뢰의 잠수함 공격 상황을 시뮬레이션하기 위한 교전 시나리오를 설정하고 어뢰와 잠수함의 운동을 모델링한다. 3장에서는 경어뢰의 잠수함 탐지 방법을 수중 음향 이론에 근거하여 모델링한다. 4장에서는 시뮬레이션 프로그램의 구조와 동작 방식을 설명하고, 5장에서는 반복 시뮬레이션 결과 얻

어진 데이터를 분석하여 전술 변수와 기술 변수에 따른 경어뢰의 효과도를 분석한다.

2. 교전 시나리오 및 운동 모델

이 장에서는 경어뢰 시뮬레이션 프로그램의 바탕이 되는 교전 시나리오와 어뢰 및 표적의 운동 모델을 설정한다. 이를 위해 먼저 경어뢰의 표적인 잠수함의 기준 모델을 정하고, 잠수함의 회피기동과 음향대향체계를 모델링한다. 다음으로 경어뢰의 잠수함 공격 전술과 제어 로직에 기초하여 탐색, 공격 등의 단계별 운동을 모델링한다.

2.1 잠수함 모델

표적 잠수함은 세계 각국에서 널리 운용되는 연안 작전용 디젤 잠수함을 기준으로 하였으며, 배수량은 1200톤, 크기는 $60 \times 6 \times 6$ m, 최고 속도는 22 knots, 최대 잠항 심도는 약 250 m로 가정하였다. 잠수함은 초기에 X-Y 직교좌표 상의 원점에서 출발하여 X축 방향으로 7 knots의 속도로 직진한다. 잠수함의 어뢰 경보 거리 이내에 어뢰가 나타나면, 잠수함은 회피 기동을 하며 음향대향체계를 가동한다. 잠수함의 회피 기동은 수평면 상의 진행 방향을 변경하는 침로 변경과 수직면 상의 위치를 이동하는 심도 변경으로 구성된다. 먼저 침로 변경을 위해서는 접근하는 어뢰를 가장 효과적으로 피할 수 있는 회피 방위를 결정해야 하는데, 이러한 회피 방위는 그림 1과 같이 어뢰가 발견된 방위, 즉 어뢰 경보 방위를 기준으로 전술 교범에 따라 결정된다(최성환 등, 1999).

그림 1. 어뢰경보방위에 따른 잠수함의 회피방위

그림 2. 잠수함의 침로 변경

수상 또는 수중에서 기동하는 함정은 침로 변경을 위해 조타를 하더라도 즉시 방향이 바뀌지는 않고, 기존 진행 방향을 따라 일정한 거리를 미끄러지듯 직진하게 된다. 이처럼 함정의 침로 변경 시 운동 궤적은 관성에 의해 직진하는 구간과 실제로 진행 방향이 바뀌는 침로 변경 구간으로 나눌 수 있다.

그림 2의 오른쪽에 나타난 것처럼 함정이 조타한 이후 침로가 90° 변경될 때까지 원침로 방향으로 진행한 거리를 ‘종거’라고 하며, 원침로에 수직인 방향으로 진행한 거리를 ‘횡거’라고 한다. 또한 침로가 180° 바뀔 때까지 선회한 반원 궤적의 지름을 ‘전술 회전경’이라 하고, 침로 180° 변경 이후에 그리는 완전한 원궤적의 지름을 ‘최종 회전경’이라고 한다. 종거, 횡거, 전술 회전경 및 최종 회전경은 함정의 종류, 속도 및 조타각에 따라 달라진다. 이러한 특성을 반영하여 잠수함이 침로를 변경할 때 먼저 종거의 1/2 거리만큼 직진한 후 실제 침로 변경이 시작되도록 잠수함 운동을 모델링하였다. 또한 회피 기동 시 침로를 180° 이상 변경하는 경우는 없으므로 선회 변경은 전술 회전경을 사용하여 침로 변경 시의 원 궤적을 모델링하였다(구보화 등, 2009).

심도 변경은 어뢰의 음향 탐지가 어려운 깊은 바다 속으로 내려가기 위해 실시하는데 본 논문에서는 2가지 시나리오를 고려하였다. 첫 번째 천해 시나리오는 우리나라의 서해와 같은 얕은 바다를 고려한 것으로, 여기서 잠수함은 초기에 50 m의 심도에서 기동하다가 어뢰를 발견하면 100 m의 심도로 하강한다. 두 번째 심해 시나리오는 우리나라 동해와 같은 깊은 바다를 고려한 것으로, 잠수함은 초기에 100 m의 심도에서 기동하다가 어뢰 공격을 탐지하면 최대 잠항 심도인 250 m로 하강한다. 그림 3은 잠수함의 심도 변경(하강)에 따른 운동 모습을 나타내고

그림 3. 잠수함의 심도 변경

그림 4. 잠수함의 회피기동과 어뢰음향대향체계

있는데, 자세각을 수평(0°)에서 하향으로 조정하여 목표 심도까지 하강한 뒤, 다시 자세각을 수평으로 재조정하여 심도 변경을 완료하게 된다.

일반적으로 연안 작전용 소형 디젤 잠수함은 어뢰음향 대향체계로 부유식 기만기만을 탑재하고 있으나 본 논문에서는 추가적으로 자항식 기만기와 재머(Jammer)까지 고려한다. 기만기는 어뢰의 탐지 음파를 반향하거나 함정과 유사한 소음을 발생하여 어뢰를 유인하는 장치이며 재머는 소음 클러스터를 생성하여 어뢰와 표적 사이의 음향 신호 전달을 방해하는 장치이다. 기만기는 한번에 1기씩 발사 가능하며 회피 기동을 위해 잠수함이 속도를 높여 최대속도에 도달하면 발사가 불가능해진다. 본 논문에서 기만기는 최대 4기까지 발사 가능하며 다음 기만기를 발사하기 위해 1분의 준비 시간이 필요한 것으로 가정하였다. 부유식 기만기는 잠수함에서 발사된 후 그 자리에 고

정되며 자항식 기만기는 자체 추진 기관을 이용해 잠수함의 회피 침로와 반대 방향으로 항진한다. 만약 어뢰가 자항식 기만기에 유인되지 않고 잠수함을 탐지하여 추적하면 재머를 발사하는데 재머는 2개가 한 쌍으로 구성되며 2회에 걸쳐 총 4개가 발사 된다. 한 쌍의 재머는 잠수함 진행 방향에서 좌우 30°, 거리 40 m에 멈추어 작동을 시작한다. 재머의 음향 신호 교란 반경은 20 m이며 지속 시간은 40초로 가정하였다(Knut Rief Armo, 2000).

2.2 경어뢰 모델

2.2.1 발사 단계

경어뢰의 발사 플랫폼은 수상함의 어뢰 발사관, 장거리 대잠로켓(ASROC), 헬기, 대잠 초계기 등으로 다양하나 바다에 투하된 이후 수중에서의 어뢰 동작은 동일하다. 이처럼 다양한 경어뢰의 발사 방법을 모두 시뮬레이션 하기는 어려우므로 본 논문에서는 경어뢰의 발사 과정에 대한 시뮬레이션은 생략하며 어뢰의 입수(入水) 시점 이후부터 고려한다. 이 때 어뢰는 잠수함으로부터 어뢰의 최대탐지거리 이내에 투하된다고 가정한다.

2.2.2 탐색 단계

경어뢰는 입수 후에 수중 환경이 천해인지 또는 심해인지에 따라 각기 다른 방식의 탐색을 수행한다. 천해 탐색 모드로 설정된 경우 어뢰는 탐색 설정 심도까지 내려가 2차원 평면상에서 원형 탐색을 수행한다. 원형 탐색 시 어뢰는 그림 5의 왼쪽과 같이 작은 원과 큰 원을 반복하여 그리며 탐색을 수행하는데 작은 원은 큰 원에 비해 어뢰의 선회각속도가 2배가 된다. 심해 탐색 모드일 때는 그림 5의 오른쪽과 같은 나선형 탐색을 수행 하는데, 나선형 탐색은 하한 심도(Lower Bound)와 상한 심도(Upper Bound) 사이에서 상승과 하강을 반복하며 탐색을 하는 방법이다. 하강할 때는 직진하며, 상승할 때는 나선형 운동을 하며 탐색한다(김찬기 등, 2001).

그림 5. 경어뢰의 표적 탐색 방법

2.2.3 공격 단계

탐색 단계에서 표적 탐지에 성공하면 공격 단계로 들어가 호밍(Homing) 유도가 시작된다. 호밍 유도는 표적이 탐지된 방향으로 어뢰의 진행 방향을 정렬하여 표적을 추적하는 과정이다. 경어뢰의 경우 표적인 잠수함이 수중의 3차원 공간에서 기동하므로 어뢰 역시 호밍 유도 과정에서 침로와 함께 심도 조타를 수행하여 3차원 운동을 하게 된다. 그러나 얕은 바다(천해)에서는 공격단계일 때의 심도 조타는 불필요하므로 어뢰가 표적에 완전히 접근할 때까지 심도 조타가 지연된다. 공격 단계에서 표적을 잃어버린 경우 탐색 모드로 되돌아가 재탐색을 수행하는데, 천해인 경우 즉시 설정된 탐색 심도로 되돌아가 원형탐색을 수행하며, 심해인 경우 표적을 잃어버린 심도에서 일단 나선형으로 상승하면서 상한 심도까지 탐색을 수행한 후 본래의 나선형 탐색 모드로 돌아간다(최성환 등, 1995).

2.2.4 최종 공격 단계

공격 단계에서 어뢰가 호밍 유도를 통해 표적에 일정 거리 이내로 접근하면 최종 공격 단계로 전환되는데 근접 거리에서 표적 추적을 효과적으로 하기 위해 속도 및 조타 속도가 2배가 된다. 최종 공격단계에서 표적을 잃어버린 경우에는 그 위치에서 2회전 원형 탐색 후 설정 탐색 모드(천해 모드, 심해 모드)로 돌아간다.

3. 음향 탐지 모델

이 장에서는 경어뢰의 음향 탐지 모델에 대해 설명한다. 방사 소음이 작은 잠수함을 공격하는 경어뢰는 먼저 음파를 송출한 뒤 표적에 반사되어 돌아오는 반향음을 수신하여 탐지하는 능동음향탐지방식을 사용한다. 표적 탐지의 판단은 수신된 반향음의 세기가 미리 설정된 탐지 임계치보다 클 때 표적이 탐지된 것으로 간주하는 방식으로 이루어진다. 능동음향탐지 모델에서 반향음의 세기와 탐지 임계치를 계산하는 방법은 다음과 같다.

3.1 반향음 세기

반향음의 세기는 어뢰의 능동 소나에서 송출한 음향 신호의 세기와 전달 경로에서의 손실, 표적에서 반사될 때의 반사 단면적, 수중 소음에 의한 상쇄 효과 등의 영향을 받는다. 이러한 요소들을 고려하여 반향음 세기를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$P = P_{0dB} + 10\log(G_t \cdot G_r) + 10\log(\sigma) + (SPG + DI - FLL) - 40\log(R) - NL - FAT - \alpha \quad (1)$$

여기서, P : 반향음의 세기

P_{0dB} : 소나 송신 출력

G_t, G_r : 송신 이득, 수신 이득

σ : RCS(Radar Cross Section)

SPG : Signal Processing Gain

DI : 지향 지수(Directivity Index)

FLL : Feed Line Loss

R : 소나와 표적 간 거리(yard)

NL : 소음 준위(Noise Level)

FAT : 주파수에 의한 감쇠

α : 환경에 의한 영향

위의 식 (1)에서 P_{0dB} , SPG , FLL , α 등의 파라미터들은 미리 설정된 수중 환경 시나리오에 따라 정해진 값을 대입하여 사용하며 그 외의 변수들은 시뮬레이션 중에 실시간으로 계산한다. 이러한 파라미터들 중에서 주의할 것은 소음 준위인데, 소음 준위에는 자연 수중 소음뿐만 아니라 어뢰 자체의 소음도 포함되기 때문에 어뢰의 속도에 따라 달라지는 자체 소음을 계산해야 한다. 어뢰의 속도는 탐색 시에는 저속 모드, 공격 시에는 고속 모드로 2가지 모드가 전환되기 때문에 각 모드에 따라 달라지는 어뢰 자체 소음을 고려하여 전체 소음 준위를 계산한다.

3.2 탐지 임계치

실제 어뢰의 탐지 임계치는 어뢰의 음향 탐지부 설계자에 의하여 설정되며, 이 값을 계산하기 위해서는 어뢰의 음원 준위(Source Level), 주파수, 밴드폭 등의 상세한 정보가 필요하다. 그러나 이러한 상세 설계 자료는 공개되지 않으므로, 본 논문에서는 A. Mjelde(1977), 윤현규(1996) 등이 사용한 단순화 된 탐지 임계치 설정 방법을 사용하였다. 즉, 표적이 어뢰의 최대 탐지거리에 위치하고, 표적 세기 및 빔 특성은 가장 좋은 상황일 때의 반향음 세기를 탐지 임계치로 설정하는 방법을 사용하였다.

4. 시뮬레이션 프로그램 구조

4.1 프로그램 전체 구조

시뮬레이션 프로그램이 시작되면 먼저 각 변수에 초기 값을 할당하고 어뢰와 표적(잠수함)의 초기 위치와 초기

그림 6. 경어뢰 시뮬레이션 프로그램의 흐름도

진행 방향을 설정하는 초기화 작업이 수행된다. 그 후에는 운동 제어, 위치 계산, 탐지 판단의 3단계로 구성되는 루프가 프로그램이 종료될 때까지 반복 실행된다.

먼저 운동 제어 단계는 어뢰와 표적이 탐색, 공격, 회피 등의 운동을 수행할 수 있도록 진행 방향과 속도를 조정하는 과정이다. 이 단계에서는 어뢰의 표적 탐지 여부, 잠수함에서의 어뢰 정보 등의 정보를 바탕으로 어뢰와 표적의 운동 상태를 변경할 것인지 판단한 뒤, 기동 방향(좌/우 회전, 상승/하강) 및 속도 변경(상승, 하강) 명령을 위치 계산 프로시저(Procedure)들에 전달한다. 위치 계산 단계에서는 속도, 각속도, 진행 방향 등의 정보를 이용해 직교좌표계 상에서 어뢰와 표적의 절대 위치를 계산한다. 탐지 판단 단계는 어뢰가 표적을 탐지했는지의 여부를 판단하는 것이 주된 임무인데 실제 탐지 판단을 위한 프로시저를 실행하기 전에 어뢰의 표적 탐지를 위한 몇 가지 사전 작업이 실시된다. 먼저 탐지 임계치를 설정하는 사전 작업을 수행하는데, 여기서는 어뢰의 현재 속도에 따른 어뢰 자체 소음을 고려하여 탐지 임계치(DT ; Detection Threshold)를 계산한다. 다음으로 어뢰의 탐색 선회 각속도에 따라 음파 송출 간격(PRI ; Ping Repetition Interval)을 조정하고, 5개 방향으로 음파를 송출하도록 빔 방향을 PRI 마다 바꾸어 준다. 그 후 탐지 판단 프로시저를 실행

하여 표적이 탐지된 것으로 결정되면, 탐지된 대상이 기만기와 잠수함 중에서 어느 것인지 판단하여 어뢰가 추적할 목표를 결정해준다. 종료 판단 단계에서는 표적과 어뢰 사이의 상대거리를 계산하고 배터리 수명을 체크하여 표적 격침에 성공(어뢰와 표적 간의 거리가 설정된 거리 이내로 근접)하거나 배터리 수명이 다하면 프로그램이 종료된다.

4.2 운동 제어

4.2.1 경어뢰 운동 제어 프로시저

경어뢰 운동 제어 프로시저에서는 제2장에서 설명된 어뢰 운동 모델에 따라 탐색, 공격, 최종공격 등 각 단계 간의 상호 전환을 위한 판단과 그에 따른 운동 상태 변경이 이루어진다. 이 프로시저는 하나의 함수로 작성되어 있으며 switch 문을 통해 4개의 <Step> 사이에 상호 전환이 이루어진다.

먼저 <Step 1>은 탐색 단계에 해당하는데 설정된 모드에 따라 원형 탐색(천해) 또는 나선형 탐색(심해)을 수행한다. <Step 1>에서 표적 탐지에 성공하면 더 이상 빔 조종을 하지 않고 빔 방향을 어뢰의 진행 방향과 같은 방향으로 유지하며 표적을 추적하게 된다. 다섯 방향으로 빔을 조종하는 경우 빔의 방향과 어뢰 진행 방향의 차이가 빔 폭(탐지 가능한 각도 범위) 보다 클 수 있기 때문에 표적 탐지 이후 곧바로 빔을 어뢰 진행 방향으로 바꾸면 표적을 잃어버릴 수 있다. 따라서 탐지 이후에 호밍 유도를 위해 표적 방향으로 회두(回頭)하는 동안은 탐색을 수행하지 않도록 해야 한다. 이 과정에 해당하는 것이 <Step 2>이며 이때는 빔 조종과 탐지 판단을 잠시 중단한다. 어

뢰의 회두가 끝나면 <Step 3>로 전환되며 속도를 상승하여(고속 모드) 재탐지 될 때마다 탐지된 표적 방향으로 진행 방향을 정렬한다. 공격 단계에서 표적에 근접하기 전에 표적을 소실한 경우에는 <Step 1>으로 돌아가며, 근접 후에 표적을 소실하면 <Step 4>로 전환하는데 여기서는 먼저 어뢰의 중동요각을 수평으로 조정한 뒤 2회전 원형 탐색을 실시하고, 탐지에 실패하면 <Step 1>으로 돌아간다.

4.2.2 표적 운동 제어 프로시저

표적 운동 제어 프로시저는 잠수함의 침로 및 심도 변경, 기만기 발사 등의 하위 프로시저들로 구성된다. 잠수함은 초기에 직진을 하다가 어뢰가 경보거리 이내로 접근하면 회피기동을 시작하는데, 회피기동은 침로 변경 프로시저와 심도 변경 프로시저가 독립적으로 처리되어 동작한다. 침로 변경을 위해서는 먼저 어뢰 경보 방위에 따라 회피 방위를 결정하고, 조타각(현재 침로와 회피할 침로 사이의 각도 차이)과 현재 속도에 따라 정해지는 종거 및 전술회전경에 의해 잠수함의 수평면 경로를 결정한다. 이때 회피 방위, 종거, 전술회전경 등의 결정은 데이터 베이스로 저장된 값을 조타각과 속도를 기준으로 검색하여 읽어오는 방식으로 이루어진다. 또한 심도변경은 잠수함의 자세각(pitch)을 조정하여 하강한 뒤 목표 심도에 도달하면 다시 자세각을 수평으로 조정하는 방식으로 처리된다. 기만기 발사 프로시저는 사용할 음향대향체계의 종류에 따라 각각 발사 시점을 판단해야 하는데, 부유식 기만기와 자항식 기만기는 회피기동 시작과 동시에 발사되며 재머는 사용자가 발사 시점을 설정하도록 되어 있다. 기만기나 재머 등의 음향대향체계는 어뢰의 잠수함 탐지에 영향을 주는 요소이므로 이들이 발사되었다는 정보를 표적 탐지 판단 프로시저에 메시지로 알리게 된다.

그림 7. 경어뢰 운동 제어 프로시저의 흐름도

4.3 위치 계산

경어뢰와 잠수함 표적의 운동은 제2장에 기술된 교전 시나리오와 운동 모델에 따라 이루어지며 이러한 운동 궤적을 계산하기 위해 다음 식 (2)와 같은 질점 운동 방정식을 사용한다(김찬기 등, 2001).

$$\begin{aligned}
 X(k) &= X(k-1) + V(k)\sin\theta(k)\cos\phi(k)T \\
 Y(k) &= Y(k-1) + V(k)\sin\theta(k)\sin\phi(k)T \\
 Z(k) &= Z(k-1) + V(k)\cos\theta(k)T
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $X(k), Y(k), Z(k)$: 현재 위치
 $X(k-1), Y(k-1), Z(k-1)$: 이전 위치
 $V(k)$: 속도(m/s)
 $\theta(k)$: 현재 시점 k 의 종동요각(pitch)
 $\phi(k)$: 현재 시점 k 의 선수동요각(yaw)
 T : Sampling 간격(sec)

위 식으로부터 어뢰와 잠수함의 위치를 계산하기 위해 가장 중요한 정보는 진행 방향(종동요각, 선수동요각)과 속도임을 알 수 있다. 이 두 가지 정보는 운동 제어 프로시저에서 알려주는 정보에 따라 위치 계산 프로시저에서 계산한다. 예를 들어 어뢰의 진행 방향은 어뢰 운동 제어 프로시저에서 알려주는 기동 방향 정보에 따라 다음 식 (3)을 이용해 선회 각속도를 먼저 결정한다.

$$\dot{\theta} = \begin{cases} -\alpha & (\text{하강}) \\ 0 & (\text{직진}) \\ +\alpha & (\text{상승}) \end{cases}, \dot{\phi} = \begin{cases} -\beta & (\text{좌회전}) \\ 0 & (\text{직진}) \\ +\beta & (\text{우회전}) \end{cases} \quad (3)$$

여기서 $\dot{\theta}, \dot{\phi}$ 는 각각 종동요 각속도(pitch rate), 선수동요 각속도(yaw rate)이며 α, β 는 다음 식 (4)에 의해 계산된다.

$$\alpha = \frac{30 \cdot |\theta_C - \theta_M|}{70}, \beta = \frac{30 \cdot |\phi_C - \phi_M|}{90} \quad (4)$$

위 식에서 θ_C 와 ϕ_C 는 각각 변경하고자 하는 종동요각(pitch)과 선수동요각(yaw)의 값이며 θ_M 와 ϕ_M 는 현재의 종동요각과 선수동요각의 값이다. 식 (4)에서 분자의 '30'은 종동요 각속도 및 선수동요 각속도의 최대값을 30°/sec로 제한하기 위한 것이며 분모의 '70'과 '90'은 종동요각과 선수동요각의 발생 가능한 최대 변화량이다. 이렇게 계산된 선회각속도를 이용해 매 샘플링 간격 마다 어뢰의 진행 방향(pitch, yaw)을 업데이트 한다.

4.4 탐지 판단

그림 8은 경어뢰의 탐지 판단 프로시저를 나타낸 흐름도이다. 경어뢰에서 사용하는 능동 음향 탐지 방식은 매 PRI 마다 음파를 송출하는데, 프로그램 상에서는 PRI 마다 음파 송출과 관련된 정보를 저장한다. 예를 들어 PRI가 t_1 초라면 매 t_1 초 마다 어뢰가 음파를 송출한 위치와 방향, 그리고 그때의 시각을 저장한다. 음파를 송출한 시점에는 탐지를 할 수 없기 때문에 관련된 정보만 저장하고

그림 8. 경어뢰 탐지 판단 프로시저의 흐름도

종료하며 그 외의 시점에는 탐지를 위한 프로시저를 진행 한다. 탐지 판단을 위해서는 먼저 음파를 송출한 위치와 현재 표적 위치 사이의 거리를 구해 음파의 진행거리와 비교한다(거리 조건 판단). 다음으로 어뢰의 빔 폭 내에 표적이 있는지를 판단(빔폭 조건 판단)하여 최종적으로 음 파가 표적에 도달하였는지 판단한다. 음파가 표적에 도달 했다면 그 시점에서의 표적의 위치와 시각을 저장하고 앞 의 과정을 역으로 진행하여 반향음이 어뢰에 도달하였는지 판단한다. 반향음이 어뢰에 도달했다면 어뢰가 음파를 송 출한 위치와 표적이 음파에 접촉한 위치를 이용해 표적의 측면각(aspect angle)과 어뢰 시선각 등을 계산한 후, 최 종적으로 수신 음파의 세기를 계산한 뒤 탐지 임계치와 비교하여 탐지 여부를 판단한다.

한편, 잠수함에서 발사한 음향대항체계는 어뢰의 표적 탐지에 영향을 주게 된다. 부유식 기만기와 자향식 기만기 등은 표적과 유사한 음향 신호로 어뢰를 유인하는 장치이므로, 탐지 판단 프로시저에서는 표적과 유사하게 처리하 며 표적 강도만 더 높은 값을 갖도록 한다. 즉, 기만기가 발사되면 기존의 잠수함 표적과 함께 표적강도가 더 높은 표적 하나가 추가 되는 것이다. 이처럼 2개 이상의 표적 이 동시에 존재하는 경우에 탐지 판단 프로시저에서는 매

PRI 간격마다 먼저 들어온 반향음원 중에서 신호의 강도가 가장 큰 대상을 표적으로 간주한다. 재머의 경우는 소음 클러스터를 발생시켜 어뢰의 탐지 음파를 차단하는 역할을 하므로, 재머가 투하된 위치에 구(球)형의 음파 차단 물체가 존재하는 것으로 처리한다. 즉, 어뢰와 표적을 연결하는 직선을 찾고 이 직선과 재머 중심 좌표와의 거리를 계산하여(점과 직선 사이의 거리) 재머의 음향 교란 반경보다 작은 경우 어뢰의 탐지 음파 전달이 방해받은 것으로 판단하였다.

5. 시뮬레이션 결과 및 효과도 분석

5.1 효과도 측정 지수 및 계산 방법

본 논문에서는 어뢰의 효과도 측정 지수(MOE : Measure Of Effectiveness)로 표적격침확률을 사용한다. 격침 확률은 일반적으로 사용되는 ‘명중 확률’과의 개념 혼동을 피하기 위해 본 논문에서 정의한 것으로서, 설정된 전술 상황에서 어뢰가 발사되어 탐색 및 공격 과정을 수행하여 최종적으로 표적을 명중 및 격침시킬 확률을 말한다. 이때 어뢰가 표적에 명중한 것은 곧 표적이 격침된 것으로 판단하며 시뮬레이션 상에서 어뢰의 표적 명중 및 격침은 어뢰가 표적 중심 좌표로부터 표적 길이의 1/2 이내로 접근한 경우로 정의한다.

어뢰의 표적격침확률을 산출하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하였는데, 어뢰의 표적 공격을 반복 시뮬레이션 한 뒤 표적이 격침된 횟수를 시뮬레이션 횟수로 나누어 격침 확률을 계산하였다. 그리고 몬테카를로 시뮬레이션에 필요한 확률 변수로는 어뢰의 초기 진행 방향을 사용하였다. 경어뢰는 바다에 투하된 후 초기에 임의의 방향으로 직진하여 탐색 심도까지 내려가기 때문에 경어뢰의 초기 진행 방향을 균일 분포의 확률 변수로 정의할 수 있다. 이에 따라 본 논문에서는 그림 9와 같이 총 12가지의 초기 진행 방향에 대해 시뮬레이션한 뒤 표적이 격침된 횟수를 12로 나누어 표적격침확률을 계산하였다. 또한 어뢰의 입수 지점에 따라 표적격침확률이 어떻게 달라지는지 알아보기 위해 잠수함의 위치를 원점으로 하는 극좌표계에서 거리는 100 m 간격으로, 각도는 10° 간격으로 격자(Grid)를 설정하여 총 540개의 어뢰 입수 지점에 대해 표적격침확률을 계산하였다.

표 1. 시뮬레이션 주요 변수의 초기 입력 값

변수명	변수값
잠수함 속도	순항 속도 : 7 knots
	최대 속도 : 22 knots
어뢰 속도	저속 모드 : 35 knots
	고속 모드 : 45 knots
어뢰의 최대 탐지 거리	1500m
어뢰 송/수신 빔폭	30° / 30°
어뢰 배터리 수명	8분
Sampling 간격	0.1초

그림 9. 어뢰의 투하위치 및 초기진행방향

5.2 천해 시나리오에서의 효과도

먼저 천해 시나리오에서 어뢰의 입수 지점 별로 표적 격침확률을 구하여, 확률 값에 따라 색상을 달리하여 표시하였다. 색상이 적색(그림 하단 Color Bar의 맨 오른쪽 색상)에 가까울수록 격침 확률이 높음을 나타낸다.

그림 10은 표적이 어뢰 대항 수단으로 회피기동과 함께 부유식 기만기를 사용한 경우의 격침 확률을 나타낸다. 표적의 좌현(그림의 0°~90°)과 우현(180°~270°)에서 격침 확률의 차이가 나타나는데 이는 어뢰가 시계방향으로 먼저 2회전 선회한 뒤, 반시계방향으로 선회하는 원형탐색 방법을 사용했기 때문이다. 따라서 천해에서 위와 같은 원형탐색을 사용할 때에는 어뢰 투하 목표 지점을 표적의 우현으로 잡는 것이 효과적임을 알 수 있다.

그림 11은 표적이 어뢰와 접촉했을 때 회피기동과 함께 음향대향체계로서 자항식 기만기와 재머를 사용한 경우의 격침 확률을 나타낸 것이다. 그림에서 45°, 거리 200 m 부근이 격침 확률이 가장 높게 나타나는데 이 지역은 잠

그림 10. 경어뢰의 입수 지점별 표적격침확률
(천해, TACM = 부유식 기만기)

그림 12. 경어뢰의 입수 지점별 표적격침확률
(심해, TACM = 부유식 기만기)

그림 11. 경어뢰의 입수 지점별 표적격침확률
(천해, TACM = 자향식 기만기 + 재머)

그림 13. 경어뢰의 입수 지점별 표적격침확률
(심해, TACM = 자향식 기만기 + 재머)

수함이 부유식 기만기를 사용할 때에도 80%이상의 격침 확률을 보이는 곳이다. 따라서 천해에서는 이곳을 어뢰 투하 목표 지점으로 잡는 것이 바람직하다.

5.3 심해 시나리오에서의 효과도

두 번째로 심해 시나리오에서의 표적격침확률을 구하여 그림으로 나타내었다. 그림 12는 표적이 회피 기동과 함께 음향대향체제로 부유식 기만기를 사용한 경우의 격

침 확률이며, 그림 13은 표적이 자향식 기만기와 재머를 사용한 경우의 격침 확률을 나타낸다. 천해 시나리오(그림 10, 11)와 비교하면 격침 확률 80% 이상인 영역(적색, 주황색)이 크게 줄어 든 것을 알 수 있다. 심해 시나리오에서도 거리 (500 m, 225°) 부근의 영역은 탐지 확률이 80% 이상으로 높은 것을 알 수 있으며, 따라서 심해에서는 경어뢰의 목표 투하 지점을 이 곳으로 잡는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 잠수함 표적의 회피 기동과 어뢰음향대향체계까지 고려한 경어뢰 교전 시뮬레이션 프로그램을 개발하고, 이를 이용해 천해와 심해 시나리오에서 어뢰의 입수 지점 및 잠수함의 음향대향체계에 따른 경어뢰의 효과도를 분석하였다. 그 결과 심해 보다 천해에서 잠수함의 음향대향체계 종류에 따라 경어뢰의 표적격침확률이 크게 차이가 나는 것을 알 수 있었으며, 수중 환경 및 잠수함의 음향대향체계 시나리오 별로 표적 탐지 및 격침에 효과적인 경어뢰 투하 지점을 도출할 수 있었다. 이러한 연구 결과는 해군의 경어뢰 운용 전술 개발에 활용될 수 있다. 어뢰의 성능과 잠수함의 어뢰음향대향체계는 계속 발전하고 있으므로 앞으로 어뢰와 잠수함의 최신 기술을 반영한 시뮬레이션 프로그램 개발이 계속 되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 고용석(1994), “유도탄 수중 발사 체계 효과도 분석 기법 연구”, 국방과학연구소 기술보고서, NWS-719-941041.
- 구본화, 이영현, 박정민, 정석문, 홍우영, 김우식, 임모택, 고한석(2009), “회피기동에 강인한 수상 항적 탐색 방법”, 한국군사과학기술학회지, 제12권, 제1호, pp. 8-17.
- 김찬기, 이심용(2001), “경어뢰의 원형/나선형 탐색 효과도 분석”, 국방과학연구소 기술보고서, NSDC-519-010002.
- 박정민, 구본화, 홍우영, 고한석, 임모택, 김우식(2007), “표적의 회피 기동 및 기만기를 고려한 음향 유도 어뢰의 효과도 분석”, 2007년도 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 제26권, 제1(s)호, pp. 41-46.
- 박정민(2008), “음향 유도 어뢰의 효과도 분석”, 석사학위논문, 고려대학교.
- 신지환(2007), “교전수준 어뢰체계 표준모델 개발 방안 연구”, 한국시뮬레이션학회 논문지, 제16권, 제3호, pp. 19-28.
- 윤현규(1996), “어뢰 탐지 효과도 분석 기법 연구”, 국방과학연구소 기술보고서, NWS-519-960331.
- 이영현, 박정민, 송태업, 구본화, 임모택, 고한석, 정석문, 홍우영(2009), “음향/항적 융합 추적 대잠어뢰의 효과도 분석”, 한국군사과학기술학회 2009년 종합학술대회 논문집, pp. 534-537.
- 최성환, 송광섭, 허성필, 이상용, 김연선, 이형욱(1995), “합정 회피 확률 분포의 최적화 기법 연구”, 국방과학연구소 기술보고서, NWS-417-950227.
- 최성환, 허성필, 정석문, 신성철(1999), “어뢰 대항 전술 개발을 위한 알고리즘 연구(I)”, 국방과학연구소 기술보고서, NWS-413-990150.
- A. Mjelde (1977), “A Homing Torpedo : The Effect of the Tactical Situation and the Torpedo Parameters on the Torpedo Effectiveness”, Master Thesis, Naval Postgraduate School (USA).
- Knut Rief Armo (2000), “The Relationship Between a Submarine's Maximum Speed and It's Evasive Capability”, Master Thesis, Naval Postgraduate School (USA).

박 정 민 (destin11@korea.ac.kr)

2006 고려대학교 전기전자전파공학부 학사
2008 고려대학교 전자전기공학과 석사
2008~현재 고려대학교 전자전기공학과 박사과정

관심분야 : 지능제어, 시뮬레이션, 이동로봇

구 본 화 (bhku@ispl.korea.ac.kr)

2000 광운대학교 제어계측공학과 학사
2002 고려대학교 전자공학과 석사
2008 고려대학교 영상정보처리학과 박사
2009~현재 고려대학교 연구교수

관심분야 : 표적 탐지/추적, 데이터 융합

이 영 현 (yhlee@ispl.korea.ac.kr)

2007 고려대학교 전기전자전파공학부 학사
2007~현재 고려대학교 영상정보처리학과 석박사통합과정

관심분야 : 신호처리, 개체 검출, 영상 인식

류 동 기 (duckii@korea.ac.kr)

1991 경북대학교 전자공학과 학사
1993 경북대학교 전자공학과 석사
1993~2006 국방과학연구소 어뢰체계부 선임연구원
2006~현재 국방기술품질원 선임연구원
2009~현재 고려대학교 메카트로닉스학과 박사과정

관심분야 : 유도 항법 조종 알고리즘, 모델링 & 시뮬레이션

홍 우 영 (hi2hong@paran.com)

1982 해군사관학교 전자공학과 학사
1985 연세대학교 전자공학과 석사
1991 Univ. of Minnesota 전자공학과 박사
1997~2000 미국 해군사관학교 전기공학과 교환교수
1987~현재 해군사관학교 전기전자공학과 교수

관심분야 : 디지털 신호처리, 수중음향 및 레이더 신호처리, 탐지 및 추정이론

고 한 석 (hsko@ispl.korea.ac.kr)

1982 Carnegie-Mellon University 전기공학과 학사
1986 University of Maryland 시스템공학과 석사
1988 Johns Hopkins University 전기공학과 석사
1992 Catholic University of America 전기공학과 박사
1983~1995 White Oak 연구소 Principal Engineer
1992~1995 University of Maryland Part-time Assistant Professor
1995~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 교수

관심분야 : 영상 및 음성 신호처리, 패턴 인식

임 묘 택 (mlim@korea.ac.kr)

1985 고려대학교 전기공학과 학사
1987 고려대학교 전기공학과 석사
1990 Rutgers University(U.S.A.) 전기공학과 석사
1994 Rutgers University(U.S.A.) 전기공학과 박사
1994~1995 삼성종합기술원 선임연구원
1995~1996 창원대학교 전임강사
1996~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 교수

관심분야 : 제어 및 필터 설계, 영상처리, 이동로봇