

통계적 메타모델을 이용한 어뢰의 탐지확률 분석 (Analysis of Detection Probability of Torpedo Using Statistical Metamodel)

허 성 필

해군사관학교, 경남 진해시 애곡동 사서함 88-1

Abstract

A homing torpedo's performance can be expressed a function of many variables, i.e. technical and tactical variables. When designing a homing torpedo, these variables have to be decided upon. The system effectiveness of a homing torpedo can be determined by analyzing of these variables. This paper describes a procedure of simulation metamodelling using a Factor Analysis methodology. A simulation model was used in order to obtain the data base for analyzing detection probability of torpedo. By analyzing the main and interaction effects of these variables on the analysis of detection probability, we will show the importance of certain variables of a homing torpedo.

1. 서 론

2차 세계대전이래 현대 해군의 전투 능력은 함정 및 무기체계에서 현저하게 발전되고 있으며, 또한 이러한 체계를 효과적으로 이용하는 일도 대단히 중요한 사항이다.

이를 위해서는 무기체계의 성능에 영향을 미치는 여러변수, 주위의 환경 조건, 허용 가능한 전술 등 제반 요소를 충분히 이해해야만 무기체계의 효율을 극대화시킬 수 있다. 따라서 어뢰의 성능에 영향을 미치는 요소에 관한 연구결과는 어뢰를 사용하는 전술지휘관뿐만 아니라 향후 무기체계의 연구개발 및 획득에 관련된 종사자들에게도 대단히 중요한 사항이다.

무기체계의 실제 운용성능은 무기체계의 고유의 목적인 임무의 달성 정도 즉 효과도(Effectiveness)로 표현되어질 수 있으며, 이는 가용도, 의존도, 성능 발휘도가 결합되어 정량적으로 산출 되어지는 양이나 본 논문에서는 체계의 신뢰도와 관련된 가용도와 의존도를 제외한 성능 발휘도의 영향만을 고려하는 효과도 즉 어뢰의 탐지확률에 대해서 분석하고자 한다. 이러한 효과도를 산출하는 방법에는 실제적인 해상시험, 수학적인 모델링 그리고 경험적으로 증명된 근사식을 적용하여 컴퓨터에 의한 모의실험 등의 방법이 이용되어지고 있다[1, 2, 3].

기존의 어뢰효과도 분석에서는 주로 컴퓨터 모의실험에 의한 출력을 단순히 2개의 변수들에 대한 감도분석을 통한 관계를 비교했다. 본 연구에서는 단순히 모의실험만으로는 모델의 변수들의 입력에 따른 출력의 관계를 분석자에게 제공하지 않으므로 변수들의 여러조합에 대한 효율적인 모의실험 계획을 수립하고 출력을 분석함으로써 입력변수들이 모의실험의 출력에 미치는 영향과 그 의미를 분석할 수 있다.

이렇게 복잡한 모의실험 모델을 이해하기 쉽게 해 주고 의미있게 설명해줄 수 있는 모델을 메타모델이라 하며[4], 본 논문에서는 유도어뢰의 기술적 변수 및 전술상황을 고려하여 표적을 공격하는 상황에 대한 컴퓨터 모의실험 모델의 구축과 어뢰의 탐지확률에 미치는 기술적 및 전술적 요인들의 효과를 통계적으로 분석할 수 있는 메타모델을 요인분석을 이용하여 비교 분석한다.

2. 표적탐지 모델

2.1 개요

음향 유도어뢰는 음향 탐지체계(소나)를 이용하여 음파를 송신하고 그의 반향음을 수신하여 추적하는 어뢰로서 성능은 속도(Speed), 최대 어뢰 주행거리(Max torpedo run), Sweep 각, 기술적 탐지거리(Technical detection range), 빔폭 특성, 핑 송신율(Ping transmission rate), 선회률(Turn rate)등으로 구성된 어뢰 자체의 기술적인 변수(Torpedo variables)와 발사거리(Firing range), 공격각(Attack angle), 표적속도(Target speed), 표적의 형태, 전술적 탐지거리(Tactical detection range)등으로 구성되는 전술상황에 따른 변수의 함수로서 표현할 수 있다.

어뢰 변수는 상호 요소간에 깊은 관련이 있는 바 한 예가 최대 탐지 거리와 송신음과의 관계이다. 어뢰가 음파를 송신하고 표적으로부터 반사음이 수신된 후에 다음의 송신 핑(Ping)이 송신되어야 함으로 최대 탐지 거리와 핑 송신음과는 상호 관련이 있음을 알 수 있다[5].

본 문서를 통하여 어뢰가 표적에 대한 명중의

정의는 어뢰가 표적을 탐지하는 것으로 간주하며, 어뢰가 표적을 탐지한다는 것은 어뢰의 능동소나가 첫 번째 음파 펄스를 발사한 후 수신된 반향 신호가 표적으로부터 온 경우로서 정의하였다. 표적 탐지 모델을 유도하기 위하여 사용되어진 용어의 설명은 본문에서는 생략하기로 한다.

2.2 가 정

문제의 단순화를 위하여 수평만을 고려하는 2차원 문제로 가정하며, 표적과 어뢰의 속도는 항상 일정하고, 표적의 회피기동은 없다. 탐지여부는 반향음의 deflection threshold level을 넘으면, 탐지로 간주하여 확률은 1이고, 탐지가 안된 경우는 확률을 0으로 한다. 발사에 관한 기계적인 신뢰도는 완전하다는 가정 하에서 시작하며, 어뢰 발사각은 표적운동분석에 의하여 예측된 표적자료로부터 구한다. 각 표적은 어뢰발사후 일정한 방향으로 진행한다[6].

2.3 탐지모델링 절차 및 확률변수의 분포

공격하는 상황을 탐지확률의 계산에 의한 모델로 표현하기 위한 절차는 아래와 같다.

- 단계 1 : 입력변수들을 정의한다.
(전술변수 및 기술변수)
- 단계 2 : Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행한다.
(오차변수들의 분포화 : 표적거리, 표적속도, 표적의 침로)
- 단계 3 : 어뢰를 발사한다.
(표적운동분석에 의한 어뢰발사각 계산)
- 단계 4 : 사형탐색에 따른 어뢰변수를 변화시킨다.
(선회율, 수색폭, 송신율, 수신 및 송신 로브 등)
- 단계 5 : 어뢰 및 표적을 기동 실시한다.
(매단위 시간 어뢰와 표적의 기동 계산)
- 단계 6 : 음향탐지 모델 수행한다.
(탐지모델 구성 및 탐지의 정의에 따라 매단위 시간 탐지확인)
- 단계 7 : 출력 즉 탐지확률을 계산한다.

본 모델을 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)으로 수행하기 위해서는 확률변수(Stochastic Variable)들이 필요하다. 경험적으로 보통 오차가 발생하기 쉬운 표적거리, 표적침로 및 표적속도를 확률변수로 정했다.

이들 변수들에 대한 분포는 표적의 거리에 실제 표적 거리의 $\pm 15\%$ 범위에서 균일분포(Uniform distribution)를 가지고 분포되었으며 표적의 침로는 실침로의 $\pm 15\%$ 범위에서 균일하게 분포되었고, 표적속도의 오차는 평균이 영이고 표준편차가 3 knots 가지는 정규분포(Normal distribution)로 가정하였다 [6].

2.4 문제 접근방법

어뢰 발사후 Enable range전까지 어뢰는 지정된 방향으로 직진을 하며, Enable range를 넘으면 여러 가지 탐색형태에 따라서 탐색을 시작한다. 탐색어뢰 sonar에서는 일정한 시간간격으로 음파를 소

고, 다시 반향음을 듣는다. 이때 시간간격($TTIME$)은 다음과 같다.

$$TTIME = \frac{2 \times TEDEC}{1500} \quad (\text{seconds}) \quad (1)$$

단, $TEDEC$ 는 기술적 탐지거리이며, 1500은 해수에서 음파의 전달속도(m/sec)이다.

어뢰 발사부터 탐지여부 결정까지 주어진 시간간격에 따라 표적과 어뢰의 위치, 방향, 탐지 여부 등의 시뮬레이션이 계산된다. 실제 상황에서, 어뢰가 표적을 탐지하였다면 바로 호밍 단계로 전환하게 된다. 따라서 효과적인 호밍을 위해서는 정확한 탐지여부 결정이 중요한 인자가 된다. 한 번 표적탐지를 하였다 하더라도 해양환경 등에 의한 오탐지 가능성이 있으므로, 2-5회의 연속적인 표적탐지가 이루어졌을 때 탐지를 하였다고 가정하는 것이 일반적이다.

그러나 연속적인 표적탐지 횟수는 늘릴수록 호밍 단계에서는 효과도는 증가하겠지만 탐지확률은 떨어질 것이다.

본 연구에서는 탐지의 정의를 어뢰의 능동 소나가 첫 번째 음파 펄스를 발사한 후 수신된 반향신호가 표적으로부터 온 경우 첫 번째 탐지로 정의하였다.

모의실험의 방법은 fixed time increment advance method를 이용했으며, 모의 실험내의 time increment는 0.25초로 했으며, 모의실험 run의 횟수는 150으로 했으며, 이때 탐지 확률의 추정 오차는 0.041이하의 신뢰도를 얻을 수 있다.

2.5 탐색방법

어뢰는 여러 형태의 탐색형태(사형탐색, corridor탐색, 직진회전 빔 탐색 등)을 가질 수 있으나 본 논문에서는 사형탐색만 고려하기로 한다. 사형탐색은 어뢰가 주 방향에서 주어진 선회각 속도로 좌우로 일정한 선회각 만큼 선회하면서 표적을 탐색하는 방법이며 사형탐색시 1번 탐지확률의 극대화를 위한 최적의 선회각 속도는 Lobe width와 Transmission Interval에 따라 다음과 같은 관계로 표시된다.

$$TRATE = \frac{2 \times LAMBD}{TTIME} \quad (\text{deg/sec}) \quad (2)$$

단, $TRATE$ 는 선회각속도 (deg/sec)이며, $LAMBD$ 는 Lobe width (deg)이다.

수색각이 크면 그만큼 탐색범위는 커지겠지만, 주 방향으로의 속도 감소도 커지게 된다. 따라서 s 수색각은 표적 정보에 대한 오차정도와 표적, 어뢰 속도 등의 전술적 상태에 따라 결정되어진다[6].

다음절에서 메타모델의 수립, 실험계획 및 이러한모델의 요인분석 등이 소개된다.

$$R_i^2 = \frac{TSS_i}{TSS_{REV}} \quad (6)$$

3. 메타모델의 수립과 탐지확률의 요인분석

본장에서는 메타모델의 수립과 어뢰의 전술적 특성을 나타내는 요인과 어뢰의 기술적 요인들이 탐지확률에 미치는 영향을 요인분석에 의해 분석하고자 한다[4].

3.1 메타모델의 수립

사형 탐색의 실험 계획에서 언급한 바와 같이 변수가 8개 이므로 8개 변수의 주요인과 각 요인간 교호작용(Interaction)을 이용하여 탐지확률을 예측하기 위한 메타모델로서 식(3)과 같이 가정한다.

$$Y_{i_1 i_2 \dots i_8} = \mu + \sum_{j=1}^8 (\alpha_j)_{i_j} + \sum_{j=1}^8 \sum_{k=1}^8 (\alpha_{jk})_{i_j i_k} + \varepsilon_{i_1 i_2 \dots i_8} \quad (3)$$

여기서 $\varepsilon_{i_1 i_2 \dots i_8} \sim N(0, \sigma^2)$ 이며, μ 는 전체 평균, $Y_{i_1 i_2 \dots i_8}$ 은 각 주요인 i_1, i_2, \dots, i_8 의 처리 수준의 조합에 대한 탐지확률의 추정량, $(\alpha_j)_{i_j}$ 는 j번째 요인의 i_j 번째 처리효과, $(\alpha_{jk})_{i_j i_k}$ 는 j와 k번째 요인의 i_j 번째 처리와 i_k 번째 처리의 교호 작용이다[7].

식(3)의 모델을 이용하여 탐지확률을 추정하고 각 요인과의 교호작용 효과를 예측하기 위해서 추정해야 할 변수는 $\mu, (\alpha_j)_{i_j}, (\alpha_{jk})_{i_j i_k}$ 와 σ^2 이다.

본 절에서는 상세한 추정 과정은 생략하기로 하며, 결정계수(Coefficient of determination)의 개념을 소개하기 전에 i번째 요인에 의한 변동은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$TSS_i = SS_i + \sum_{j=1, j \neq i}^8 SS_j \quad (4)$$

여기서 SS_i 는 i번째 요인에 의한 효과의 변동,

$$\sum_{j=1, j \neq i}^8 SS_j \text{는 } i\text{번째 요인과 다른 요인들간의 교호}$$

작용에 의한 변동이다. 이러한 각 요인들에 의한 변동들의 합과 오차에 의한 변동(SSE)의 총합이 수정된 총변동으로 식(5)으로 나타낼 수 있다.

$$TSS_{REV} = \sum_{i=1}^8 TSS_i + SSE \quad (5)$$

이때 i번째 결정계수 R_i^2 는 식(5)와 같이 수정된 총변동을 중에서 i번째 요인이 차지하는 비율이다[4].

이상과 같이 전체변동에서 각요인이 차지하는 결정계수의 값을 계산함으로써 각요인이 차지하는 효과가 차지하는 비중을 유추할 수 있다.

3.2 실험계획

어뢰의 전술 및 기술변수들이 탐지확률에 어떠한 영향을 미치는지 예측하기 위하여 사형탐색방법의 탐지확률의 계산을 위한 각 변수의 수준을 결정하는 실험계획은 다음과 같다.

- 어뢰속도(x1) : 40, 45, 50 (knots)
- 어뢰최대주행거리(x2) : 5000, 6400, 8000 (m)
- 선회율(x3) : 4, 6, 8 (deg)
- 수색각(x4) : 20, 25, 30 (deg)
- 평송신율(x5) : 2.8, 3.0, 3.2 (sec)
- 송신로브(x6) : 20, 23, 26 (deg)
- 수신로브(x7) : 24, 27, 30 (deg)
- 공격각(x8) : 0, 30, 60, 90, 120, 150, 180 (deg)

3.3 요인분석

식(3)은 사형탐색의 메타모델이며, 표1은 사형탐색시 주요인과 교호작용에 의한 변수와 자승합들, 그리고 분산분석표이다. 표에서 볼 수 있듯이 3가지 요인의 교호작용까지 고려하면 R^2 의 값은 94.87%이며, 따라서 식(3)과 같은 모델을 이용하여 이 모델의 주요인과 2가지 및 세가지 요인들간의 교호작용에 의한 전체변동이 약 94%이상임을 알 수 있다.

표 1. 사형탐색시 분산 분석표

요인	자유도	자승합	자승평균	F값	R ²	Prob F
주요인						
교호작용	20	311.01	15.550	9272.51	65.17%	0.000
(2변수요인)						
교호작용	168	101.36	0.603	359.75	21.24%	0.000
(3변수요인)						
오차	784	40.84	0.052	31.07	8.56%	0.000
	14336	24.04	0.002		5.13%	
계	15308	477.25			100%	

다음은 각요인들의 R^2 값을 살펴보기로 한다. 이때 표2에서 R_2^2 은 각요인들 주효과만의 R^2 값이며 R_1^2 은 R_2^2 의 값에 교호작용의 효과까지 추가한 R^2 의 값이다.

표 2. 각 요인별 R² 값(주요인 및 교호작용)

요인	DOF	SS	MS	R ₁ ²	(R ₂ ²)
x1	38	19.68	0.518	4.12%	(2.70%)
x2	38	91.82	0.416	19.24%	(11.23%)
x3	38	4.64	0.122	0.97%	(0.26%)
x4	38	3.01	0.079	0.63%	(0.06%)
x5	38	5.33	0.140	1.12%	(0.87%)
x6	38	0.58	0.015	0.12%	(0.10%)
x7	38	0.34	0.009	0.07%	(0.03%)
x8	90	286.98	3.189	60.13%	(49.80%)
total treatment	356	412.37	1.158	86.41%	(65.80%)
var. of error	14592	64.88	0.004	13.59%	(38.06%)
total	15308	477.25		100%	100%

지금까지는 각 요인들에 대한 R² 값들을 살펴 보았으며, 아울러 각 요인들의 평균 탐지확률을 살펴 보면 본 논문에서는 생략했지만 요인분석과 같은 결과 즉 공격각도와 어뢰의 최대 주행거리로 나타났다.

이상과 같이 R² 분석이나 평균탐지 확률의 변화 정도(감도분석 방법)를 살펴볼 때, 가장 크게 R² 값을 차지하며, 또한 평균 탐지확률 값의 변화를 크게 보이는 요인은 공격각이며, 2번째 요인은 어뢰의 최대 주행거리 요인임을 알 수 있다.

4. 결론

유도어뢰의 사형탐색 방법과 이들의 효과도를 표적을 처음 탐지하는 확률로 가정하여 어뢰의 기술적인 변수와 전술적인 변수들이 실제 표적 탐지확률에 미치는 영향을 분석하기 위해 단순화된 메타모델을 이용하여 사형탐색하에서 각요인들에 대한 통계적인 분석 방법 중에서 요인 분석을 이용했다.

본 분석의 결론은 사형탐색에서 전술적인 요인과 기술적인 요인들 중에서 R²(결정계수) 값이 가장 큰 값을 보인 요인은 공격 각도이며, 2번째로 큰 값은 어뢰의 최대 주행거리 요인이 있다. 이는 첫째 공격 각도는 어뢰의 전술적인 요인이며 어뢰 최대 주행거리는 기술적인 요인이다. 따라서 2가지 요인, 기술적인 요인이나 전술적인 요인 모두다 중요함을 나타내며, 앞에서 살펴보았듯이 공격각도에 대한 R²의 값이나, 평균탐지 확률값의 변화 등을 살펴볼 때 향후 어뢰를 운용할 시 효과적인 운용 즉 어뢰 공격전술이 정말 중요하다고 고려되어야 함을 나타내고 있다.

향후 연구 과제로서 본 논문에서는 표적은 회피 기동을 전혀 하지 않는다는 가정 하에서 모델이 구축되어 있으므로, 표적이 회피기동을 실시할 경우에 대한 연구와 탐지의 정의를 2회 이상의 탐지로 간주했을 경우 각 변수간의 관계 규명, 탐색 방법에 따라 탐지확률과 어뢰의 기술변수 및 전술변수들간의

관계식을 추론하는 것이 중요한 향후 연구 과제라 할 수 있겠다.

참고문헌

- [1] 고용석 “유도탄 수중발사 체계 효과도 분석기법 연구”, 국방과학연구소 연구보고서, 1994. 9.
- [2] 황홍석, “무기체계 이용효과 분석 방법론 연구”, 국방연구원 연구보고서, 1992.
- [3] A. R. Habayeb, System Effectiveness, Pergamon Press, 1982.
- [4] 이동훈 “통계적 메타모델을 이용한 음향대항체계 효과도 분석”, 국방연 연구보고서, 1995.
- [5] 허성필, 홍우영, 박영일, “전술상황 및 어뢰변수가 표적탐지 확률에 미치는 영향”, 제1회 해양무기체계 발전세미나, 국방과학연구소, 1996.
- [6] A. Mjelde, A Homing Torpedo : The Effect of the Tactical Situation and the Torpedo Parameters on the Torpedo Effectiveness, Master Thesis, Naval Postgraduate School, Sep. 1977..
- [7] 박성현, 회귀분석, 대영사, 1982.