

교전수준 잠수함 표준모델 개발 방안 연구

김동훈¹ · 신지환^{1*} · 김찬기¹

On the Development of the Authoritative Representations of Submarine for Engagement Level Simulation

Dong-Hun Kim · Ji-hwan Shin · Chan-Ki Kim

ABSTRACT

This paper describes and explains that the engagement level model of submarine can be used in underwater engagement simulation taking reuse, interoperability, and extension to the engineering leveled simulation into consideration. WBS(Work Break-down Structure), internal data interface, and I/O data about the engagement level model of submarine are developed. It describes the modeling method of components of submarine model as well. In this paper, the non-acoustic detection and stealth models are excluded because those models are not related to the underwater engagement, so the excluded models need to be developed in the future.

Key words : Submarine, Authoritative Representations, Modeling and Simulation(M&S)

요 약

본 논문에서는 미래의 수중 교전 시뮬레이션에서 공통적으로 사용될 수 있도록 재사용성 및 상호운용성과 공학 시뮬레이션 등 앞으로의 확장성을 고려하여 수중 교전에 사용되는 잠수함 체계에 대한 표준모델을 어떠한 개념에서 어떠한 형태로 정립할 것인가에 대해 기술하였다. 본 연구를 통해 교전 수준 잠수함 체계 표준모델에 대한 모델아키텍처를 정립하고 개별 구성요소들에 대한 모델링 방안을 개발하였으며 모델의 입출력 자료 및 정보 흐름도를 도출하였다. 본 연구에서는 비음향 탐지 모델 및 비음향 스텔스 모델 등 수중 교전에 해당하지 않는 분야는 제외하였으므로 향후 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

주요어 : 잠수함, 표준 모델, 모델링 & 시뮬레이션

1. 서 론

DMSO(Defense Modeling & Simulation Office)는 미 국방부 획득기술차관실 산하에 설치된 기관으로서 이 기관의 주도로 1995년 10월에 미 국방부 M&S 종합계획(MSMP)이 수립되었다. 이 계획에 따르면 M&S의 궁극적인 목표는 국방성 M&S 관련 조직들에게 합동훈련, 교리/전술 개발, 작계개발, 전투상황 평가, 기술평가, 시스템

성능향상, 전력 구조화, 프로토타입 및 완제품 개발 등과 같은 다양한 목적을 위해 보다 손쉽게 사용할 수 있고, 운용상 타당한 M&S 환경을 제공하는 것이다. MSMP에서는 중점적으로 발전시켜야 할 M&S 분야를 6개로 설정하고, 각 분야별로 전체적인 비전에 해당하는 하나의 목표를 설정하였고, 그것을 달성하기 위해 다시 몇 개의 세부 목표를 설정하였다¹⁾.

여기서, 공통기술체제(CTF; Common Technical Framework)는 시뮬레이션 모델들의 원활한 연합구성을 지원하기 위해 기존 모델들과 앞으로 개발될 모델들이 공통적으로 따라야 할 높은 차원의 지침들로서 HLA(High Level Architecture), 임무공간 개념모델(Conceptual Model of Mission Space), 그리고 데이터 표준화(Data Standardization)로 구성된다. 환경, 무기체계, 인간 행동에 대한 표

2007년 9월 5일 접수, 2007년 10월 19일 채택

¹⁾ 국방과학연구소 제6기술연구본부 1부 해양체계M&S그룹

주 저 자 : 김동훈

교신저자 : 신지환

E-mail: narabojja@add.re.kr

준모델은 다양한 시물레이션에서 상호운용성(Interoperability)을 가지고 공통적으로 사용이 가능한 다양한 객체들에 대한 표현으로서 전문가 그룹에 의해 개발/인증된 객체들에 대한 표준화된 표현이다. 특히, 무기체계 표준모델(Authoritative Representations of Systems)은 미군, 동맹군, 연합군 및 위협국 등 모든 군 세력들에 대한 주요 플랫폼, 무기, 센서, 부대, C4I 시스템, 군수지원 시스템, 생명지원 시스템 등 제반 군사 시스템들에 대한 표준 모델(표현)들을 의미한다.

미 국방부 M&S 비전에 포함되어 있는 M&S 범위를 살펴보면 가상상 훈련, 분석, 획득으로 나눌 수 있고, 계층에 대해서는 광역/전쟁, 임무/전투, 교전, 그리고 공학 수준으로 나눌 수 있다. 추가적으로 시간 진행 및 관리 방법에 따라, 그리고 인간의 참여 정도에 따라 분류를 할 수도 있다^[2].

여기서, 계층에 대한 분류를 모델의 정밀도와 무기체계 개발 지원 기능, 그리고 적용 체계의 구성 수준을 종합하여 표현하면 그림 3과 같이 정리할 수 있다. 시물레이션의 관심 영역이 넓어질수록 모델의 정밀도가 감소하고 집합도가 증가하는 반면, 관심 영역이 좁아질수록 모델의 정밀도가 증가하게 된다. 무기체계를 효과적으로 개발하기 위해서는 개발단계별로 아래의 전 계층에 대한 시물레

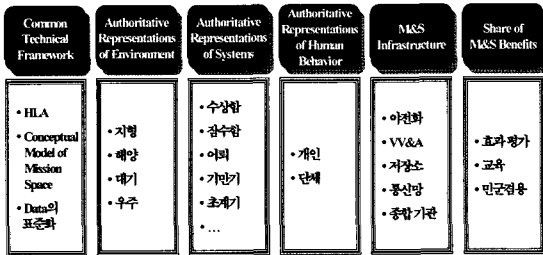


그림 1. 국방 M&S를 위한 목표 및 활동

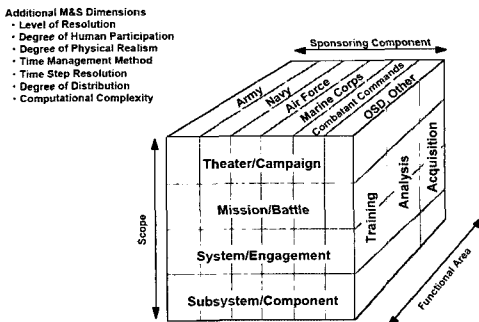


그림 2. M&S 비전에 포함되어 있는 M&S 범위

이션 도구가 필요하게 된다. 체계개발 초기단계부터 군요구나 무기체계 효과도를 분석하여 군요구의 적절성 검토와 무기체계 사양이나 부체계 사양의 도출 및 적절성 검토가 지속적으로 수행될 것이 요구되는데, 이를 위하여 무기체계에 대한 교전 수준(Engagement Level)의 M&S를 사용하고, 무기체계 설계 및 성능해석을 위해서는 공학 수준(Engineering Level)의 M&S를 사용하는 것이 일반적인 접근법이다.

군요구 분석이나 체계효과도 분석은 체계개발 초기단계에서부터 수행되어야 하는데, 체계개발 사업 준비 기간이나 인력 등의 부족으로 이를 위한 교전 수준 M&S를 구성하는 데 어려움을 겪고 있는 것이 현실이다. 이러한 이유로 기존의 조사결과^[3]에 따르면 무기체계의 연구개발에 교전 수준의 M&S를 적용하고 있는 경우가 극히 제한적임을 알 수 있다. 재사용성(Reusability)과 상호운용성(Interoperability)을 갖는 대표적인 모델들이 미리 확보되어 있다면 체계개발 착수와 동시에 이들을 사용하여 교전 수준의 M&S를 구성할 수 있을 것이다. 그러나 기존의 개념으로는 체계개발 초기에 자원과 시간을 투자하여 교전 수준의 M&S를 개발하는 경우에도 문제가 있기는 마찬가지이다. 잠수함 효과도 분석을 위해서는 잠수함, 수상함, 어뢰 등의 모델들이 필요하다. 또한 수상함이나 어뢰의 효과도 분석을 위해서도 잠수함, 수상함, 어뢰 등의 모델들이 필요하다. 이와 같이 각 무기체계 개발에서 공통적으로 필요한 모델들이 있는데, 각 무기체계 개발 과정에서 별도로 이러한 모델들을 개발하고 있어 상당한 중복투자가 발생하게 된다. 또한, 이렇게 개발된 모델들은 개발자에 따라 차이가 있을 수 있기 때문에 동일한 사건에 대한 시물레이션의 결과가 서로 달라 효과도 분석의 일관성이 유지되기 어려운 문제점이 있다. 따라서 미국의 국방

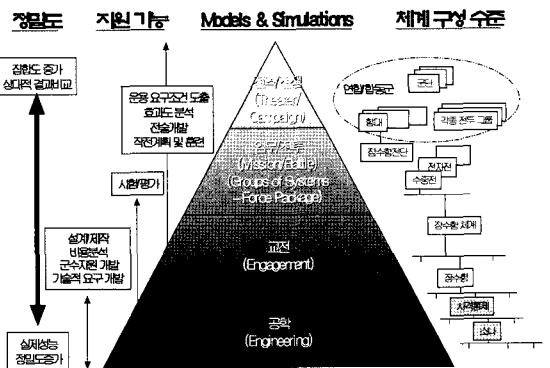


그림 3. 국방 M&S 계층별 분류

M&S 기본계획^[2]에 기술된 바와 같이 무기체계 표준모델의 개발이 시급히 요구된다.

본 연구는 수중 교전에 사용되는 잠수함 체계에 대한 표준모델을 어떠한 개념에서 어떠한 형태로 정립할 것인가에 대한 것이다. 표준모델은 다양한 체계개발 사업에서 공통적으로 사용되어야 하기 때문에 다양한 체계개발자들의 요구와 그 무기체계에 대한 개념이 정확하게 반영되어 있어야 한다. 따라서 일차적으로 기존에 개발된 잠수함 무기체계에 대한 표준모델 개발로 연구 범위를 제한하였다.

2. 표준 모델 개발 원칙

잠수함 표준모델은 미래의 수중 교전 시뮬레이션에서 공통적으로 사용될 수 있도록 재사용성 및 상호운용성과 공학 시뮬레이션 등 앞으로의 확장성을 고려하여 정립하는 것을 기본 정책으로 한다. 또한, 잠수함 표준모델은 다음과 같은 원칙에 따라 개발되었다.

- ▶ 모델의 상세도 수준(Level of Detail)을 나타내는 Level은 1을 공학 수준 모델, 2를 교전 수준 모델로 하는데, 기본적으로 본 연구에서의 표준 모델이라 함은 Level 2를 의미한다.
- ▶ S/W는 C++ 또는 C++와 용이하게 연동될 수 있는 C언어를 사용하여 작성함을 기본으로 한다.
- ▶ 표준 모델은 HLA(High Level Architecture) 기반으로 하여 국방 시뮬레이션 자원들의 재사용성과 상호운용성을 향상 시킨다.
- ▶ 표준 모델은 사건 구동(Event Driven)이 아닌 시간 간격 구동(Time-Step Driven)으로 개발함을 기본으로 한다.

3. 잠수함 표준모델 구성

3.1 잠수함 시뮬레이션 모델 조사

잠수함 표준모델은 잠수함 전투체계 효과도 분석 프로그램 자료 및 국과연이 보유한 사건 구동 기반의 잠수함 작전 효과도 분석 프로그램과 대어뢰전 표적함 시뮬레이터용 프로그램들을 기반으로 종합/분석하여 구성되었다.

3.1.1 잠수함 전투체계 효과도 분석 프로그램(MORSE)

MORSE(Maritime Operations Research into Submarine Evaluation)는 네덜란드 해군의 Walrus급 잠수함 효과도 분석을 수행하기 위해 TNO-FEL에서 개발한 프로그

램으로서 Walrus급 잠수함의 대잠/대함 탐색 및 어뢰 공격 효과도를 평가하고 Walrus급 잠수함의 해상 성능평가 지원 등 다양한 시나리오들을 사전에 모의 실험하는 목적으로 운용되고 있다. MORSE는 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하는 통계분석모드(Statistical Analysis Mode)와 선택 교전 모드(Selected Engagement Mode)인 시험 모드(Test Mode)로 운용된다^[4]. 그림 4는 MORSE 구성요소 모델들의 신호흐름을 나타낸다.

3.1.2 대어뢰전 표적함 시뮬레이터용 프로그램

표적함 시뮬레이터는 어뢰체계개발 과정에서 전술 환경을 분석하고 어뢰의 운용로직을 검증할 수 있도록 성능 분석 도구들에 연동되어 표적의 거동과 운용을 모의할 수 있는 도구로서 어뢰체계 HILS(Hardware-In-the Loop Simulation) 시스템과 연동되는 시뮬레이터이다.

여기에 탑재된 표적함 운용 시뮬레이션 프로그램은 MILS(Man-In-the Loop Simulation) 개념에 의하여 사용자가 표적함 조종 또는 어뢰대항체 운용 등에 대한 입력을 조이스틱 및 표준입출력장치를 통해 실시간으로 받아서 수행할 수 있도록 개발되었다^[5]. 그림 5는 표적함 시뮬레이터와 어뢰체계 HILS 시스템의 연동개념을 나타내는

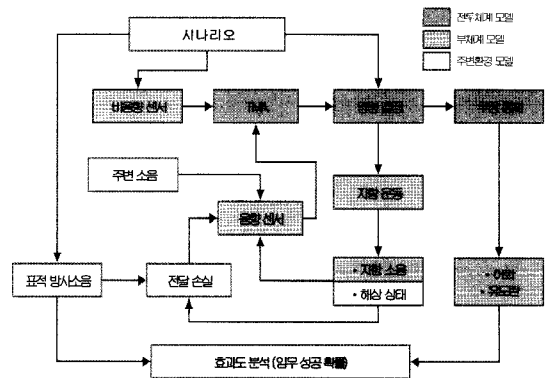


그림 4. MORSE 구성요소 모델 및 개념도

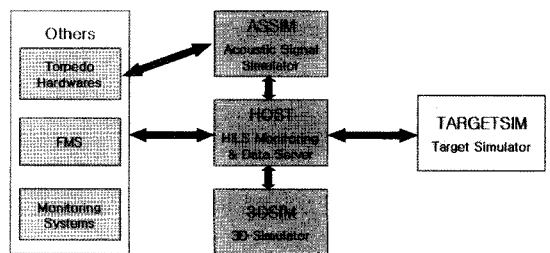


그림 5. 표적함 시뮬레이터와 HILS 연동

것으로서 표적함 시뮬레이터는 확장성과 연동성을 고려하여 HILS 시스템의 HOST 시스템과 단일 연동되도록 구축되어 있다. 연동자료는 표 1에 나타내었다.

3.1.3 잠수함 작전 효과도 분석 프로그램

잠수함 작전 효과도 분석 프로그램은 잠수함의 임무 수행 중 발생할 수 있는 대잠진, 대함진, 대지진 등의 교전 상황을 구성/모의하는 프로그램으로서, 잠수함의 임무 달성 확률을 분석하기 위해 국과연에서 개발한 프로그램이다⁷⁾. 본 프로그램의 모델링은 크게 시뮬레이션 제어 모델과 시스템 모델로 구분하여 이루어지고, 실제 모델링 작업은 그림 6과 같은 단계로 진행된다. 우선, 최하위 레벨에 속하는 잠수함 탑재 장비 및 잠수함 운용에 관계되는 기초 이론식을 정리하여 라이브러리화 함으로써 기초 수리 모델을 만들고 기초 수리 모델로 표현되어지는 세부 기능 및 특성을 조합하여 잠수함에 탑재되는 부체계의 운용 과정을 묘사할 수 있으며, 사용자의 입력에 의해 부체계들의 특성이 달라질 수 있도록 구성되어 있다. 플랫폼 모델은 함 탑재 부체계 모델을 호출하여 함 작전 시 요구되는 운용 과정을 가상적으로 재현할 수 있도록 모델링 되고, 사용자가 입력한 시나리오를 바탕으로 플랫폼 모델들의 작전/운용 과정의 시뮬레이션을 수행할 수 있도록

표 1. 표적함 시뮬레이터 연동 자료

HOST ↓ 표적함 시뮬레이터	이벤트	시뮬레이션 시작/종료	
		발사	
		전동기 회전	
		활성화	
		표적 탐지/상실	
		자료요구	
표적 초기 정보	표적 초기 정보	표적함 종류	
		표적 초기 좌표	
		표적 초기 선수각	
		표적 초기 방위	
		표적 초기 속도	
		어뢰 좌표	
표적함 시뮬레이터 ↓ HOST	이벤트	부유식 기만기 발사	
		자항식 기만기 발사	
	기만기 정보	부유식 기만기 좌표	
		자항식 기만기 좌표	
	표적 정보	표적 정보	표적 좌표
			표적 오일러각
표적 속도			
		표적 각속도	

하는 시뮬레이션 제어 모델을 작성하여 시뮬레이션을 진행하고 제어하는 역할을 맡도록 구성되어 있다.

잠수함 작전 효과도 분석 프로그램은 사건 구동(Event-Driven) 시뮬레이션 프로그램으로서 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해 다양한 성분작전에 대한 효과도를 도출하고 이에 가중치를 부여하여 대상 잠수함의 작전 효과도를 분석한다. 다양한 사건들은 시뮬레이션 하고자 하는 목적에 따라 추가되고, 한 가지 사건이 설정되면 그 사건에 의해 연이어 발생할 수 있는 사건들이 필연적으로 설정되어야 하고 종료 사건이라 할 수 있는 사건이 발생하면 명령/전술 처리 모델에서 다음 사건을 결정하여 시뮬레이션이 수행된다. 각 사건간의 연관성은 그림 7과 같이 나타낼 수 있다. 시간관리기(Time Scheduler)를 별도로 두어 장래 발생할 사건의 명칭과 발생 시점이 기록되는 미래 사

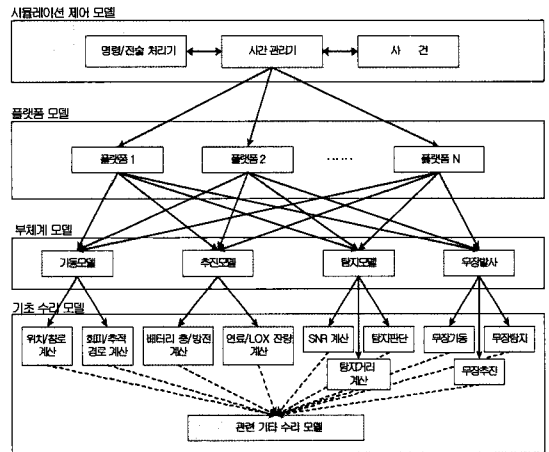


그림 6. 잠수함 작전 효과도 분석 프로그램 모델 종류 및 상관관계

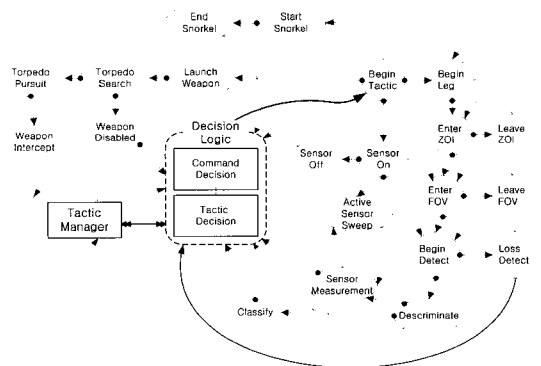


그림 7. 잠수함 작전 효과도 분석 프로그램의 사건 종류 및 연관관계

모드(Mask 모드에서는 신호준위 포함), 자함 위도/경도/심도/침로, 자함 속도, Euler 각, 무장 발사 명령이다.

무장운용 모델에서 무장체계 모델로 중어뢰 및 기만기 발사 제원과 무장발사신호가 전달되며 반대로 탑재 중어뢰 및 기만기 제원은 무장체계 모델에서 무장운용 모델로 전달된다.

스텔스 모델에서는 방사소음 준위와 표적강도 준위가, 탐지기 모델에서는 능동소나 Pulse 준위/주파수/반복시간/타입/길이/발생시간이 합성환경 모델로 전달된다.

합성환경 모델에서 탐지기 모델로 가는 정보는 환경소음, 타 플랫폼 방사소음 및 전달손실, 타 플랫폼 능동소나 Pulse 준위/주파수/타입/길이/발생시간/반복시간 및 전달손실, 어뢰 방사소음 및 전달손실, 발생시간, 어뢰 능동소나 Pulse 준위/주파수/타입/길이/발생시간/반복시간 및 전달손실, 기만기 음향신호(수동 모드, 능동 모드, Masker 모드), 자함 능동소나 신호에 대한 전달손실, 타 플랫폼 표적강도 준위, 복반사음 준위가 전달된다.

4. 잠수함 표준모델 개발

도출된 잠수함 표준모델 WBS를 기반으로 각각의 하위 구성요소 모델에 대한 모델링 방안을 아래에 기술하였다. 앞서 언급하였듯이 모델링 수준은 교전 수준에 해당하는 Level 2 수준으로 하였고, 내용도 수중 교전에 대한 것으로 한정하였다.

4.1 기동 모델

기동 모델은 Nomoto 1차 모형을 기반으로 조타에 의한 선회응답을 얻는 질점모델을 사용하였다. 교전수준 잠수함 표준모델에서 사용되는 수중운동에 대한 질점모델은 다음과 같다. 교전 수준에서 잠수함의 조종과 궤적에 관한 질점 운동 모델의 운동방정식은 수평동요(Sway), 상하동요(Heave) 및 횡동요는 무시하고, 추진모형, 선수각 조종모형, 종동요각 조종모형 만으로 아래와 같이 간단히 정립될 수 있다.

전후방향 운동(Surge Motion)은 추진기의 특성과 잠수함의 저항특성을 상세히 알 수 없을 때 식 (4.1)과 같이 간단한 형태의 전후동요 모형을 사용할 수 있다.

$$\dot{u} = \frac{V_{\max}}{T_{\max}}, \quad u_{i+1} = u_i + \dot{u} \cdot \Delta t \quad (4.1)$$

일반적으로 함의 가감속특성을 요구사항(Requirement)으로 제시할 경우 정지상태와 최대속도를 기준으로 가속

시간과 감속시간을 제시하는데 이를 위 모형의 파라메타로 설정한다. 선수동요(Yaw Motion)를 기술하는 간단한 운동모형으로서 선박유체역학에서 KT 모형으로 알려진 Nomoto 1차 모형을 사용할 수 있다. 이것은 방향타 δ_r 과 선수각의 변화율 즉 선수동요(Yaw) r 과의 관계를 식 (4.2)와 같이 기술한 것이다.

$$\dot{r} = -\frac{1}{T_r}r + \frac{K_r}{T_r}\delta_r \quad (4.2)$$

만일 잠수함의 수직타(Rudder)와 운동특성을 알 수 있다고 한다면, 루프특성 T_r 과 K_r 을 결정할 수 있을 것이다. 그렇지 않다면 식 (4.3)과 같이 전장 L , 정상선회반경 R_r , Norribin 상수 P 를 사용하여 잠수함의 선회특성을 정의하여 사용할 수 있다.

$$\frac{R_r}{L} = \frac{1}{r} \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{1}{K_r \delta_r}, \quad P = \frac{K_r}{2T_r} \approx 2.0 \quad (4.3)$$

일반적으로 함의 선회특성을 요구사항(Requirement)으로 제시할 경우 선회반경을 제시하는데 이때 타 각속도 및 최대타각에 대한 성능자료가 없으므로 식 (4.4)에서 조타각을 최대타각 100%에 대한 비율로 정의하여 K_r 과 T_r 을 결정하도록 한다. 종동요(Pitch Motion) q 역시 앞에서 언급한 선수동요 방정식과 유사하게 다음과 같이 수평타 δ_e 에 대하여 기술할 수 있다.

$$\dot{q} = -\frac{1}{T_q}q + \frac{K_q}{T_q}\delta_e \quad (4.4)$$

일반적으로 함의 심도변화 성능을 요구사항으로 제시할 경우 심도변화량에 대한 소요시간을 제시하는데 이때 수평타 각속도 및 최대타각에 대한 성능자료가 없으므로 선수동요와 동일하게 조타각과 제어판 각속도를 최대타각 100%에 대한 비율로 정의하여 K_q 와 T_q 를 결정하도록 한다. 단, 이 때 종동요각은 요구사항에서 제시되는 최대 종동요 제한값을 넘지 않도록 한다. 다음은 아래의 기동 성능 요구조건을 이용하여 기동모델을 구성한 후 시물레이션 수행한 결과이며, 요구조건에 부합하는 기동모델 구현이 가능함을 알 수 있다.

- ▶ 정상선회직경 : 4L(함 길이 50m)
- ▶ 100m 심도변경 소요시간 : 100초

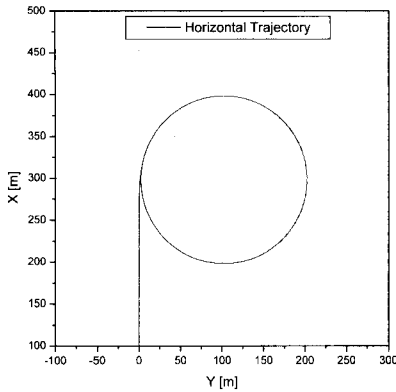


그림 10. 잠수함 선회 궤적

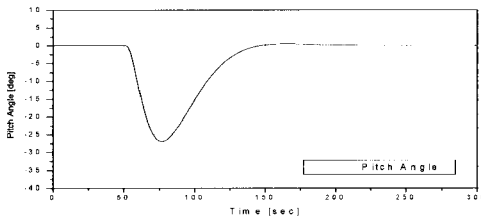


그림 11. 잠수함 종동요각 변화(100m 심도변화) 특성

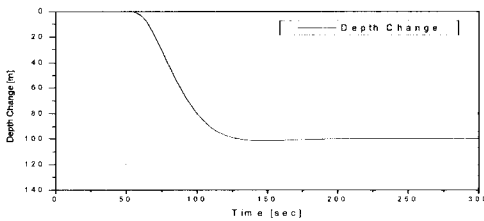


그림 12. 잠수함 심도변화(100m) 특성

4.2 탐지기 모델

탐지기 모델은 음향탐지 모델과 비음향탐지 모델로 나눌 수 있고, 본 과제의 목적이 수중 교전이므로 음향탐지 모델만 고려한다. 그림 13은 잠수함에서 표적을 탐지하는 기본 개념과 요구 파라메타를 도식화한 것이다⁹⁾.

음향탐지 모델은 소나 방정식을 기본으로 한다. 소나 방정식에 포함되는 반향수준(Echo Level), 즉 음원수준(Source Level)과 전달손실(Transmission Loss)은 환경소음(Environmental Noise) 및 복사반음(Reverberation Noise)과 함께 작전환경에 따라 합성환경 모델로부터 수신되며, 소나의 지향지수(Directivity Index)와 탐지 문턱치(Detection Threshold)와 같은 소나 특성은 자체 DB 및 입력값을 이용한다. 잠수함에 탑재되는 음향탐지기는

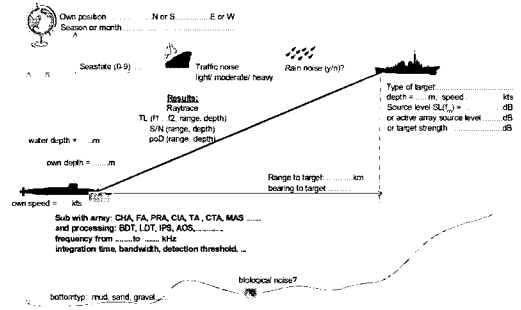


그림 13. 음향탐지 개념도

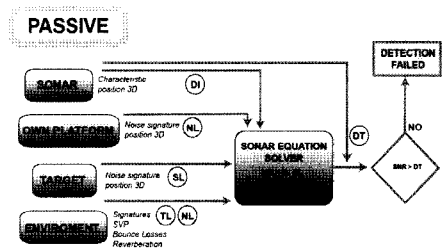


그림 14. 수동소나 방정식 및 탐지 개념도⁸⁾

음향모드에 따라 능동소나와 수동소나로 구분할 수 있고 일반적으로 능동소나는 운용 시 자신의 위치가 노출되기 때문에 거의 사용하지 않는다. 음향모드에 따라 소나방정식은 아래와 같이 달리 사용된다.

4.2.1 수동소나 방정식

$$SE = SL - TL - NL + DI - DT \quad (4.5)$$

SL(Source Level)은 표적의 방사소음으로서 주파수, 표적의 속도, 그리고 시선각(Line of Sight)의 함수이고 DI는 주파수의 함수로 표현되는 지향지수이며 DT는 탐지문턱치이다. TL은 음파의 전달손실로서 합성환경 모델에서 계산을 수행한다. 만약 구성적(Constructive) 시뮬레이션을 수행할 경우에는 아래와 같이 간단히 계산할 수 있으나, 이는 일반적인 표현일 뿐 실제 해양을 반영하기에는 한계가 있다⁷⁾.

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

$$a = \frac{0.1f^2}{(1+f^2)} + \frac{40.0f^2}{(4100.0+f^2)} + 0.000275 \times f^2 + 0.003 \quad (4.6)$$

여기서, R은 거리(Range), A는 센서의 LpA값(default = 0), a는 흡수계수(Absorption Coefficient), f는 센서 운

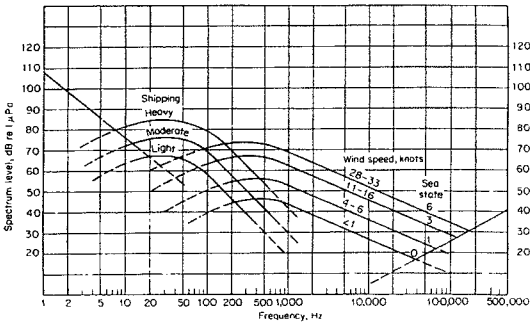


그림 15. 심해 평균 주변 소음 스펙트럼

용 주파수를 나타낸다. NL은 환경 변화에 따라 다양한 해상 상태, 풍속, 해상 교통량에 대한 환경소음으로서 합성 환경 모델에서 생성한다. 구성적 시뮬레이션을 수행할 경우 아래와 같이 심해 평균 주변 소음 스펙트럼이 용이하게 사용될 수 있다⁷⁾.

if($f > 2000$)

$$NA = -17.16812 \times \log f + 20.0 \log S + 104.6724$$

if($f \leq 2000$)

$$NA = -23.13193 \log f^2 + 68.48641 \log f + 25.41397$$

if($f < 400.0$)

$$NA = -18.31388 \log f^2 + 96.59631 \log f - 80.30145$$

if($f < 200.0$)

$$NA = -16.95281 \log f^2 + 88.42914 \log f - 59.17586$$

if($f < 130.0$)

$$NA1 = -16.95281 \log f^2 + 88.42914 \log f - 59.17586$$

$$NA2 = -15.81441 \log f^2 + 78.59327 \log f - 30.29423$$

$$NA = NA1 + (NA2 - NA1) \log(S - 2.0) / \log(3.0)$$

if($f < 100.0$)

$$NA1 = -15.81441 \log f^2 + 78.59327 \log f - 30.29423$$

$$NA2 = -12.46291 \log f^2 + 59.81797 \log f - 1.34492$$

$$NA = NA1 + (NA2 - NA1) \log(S - 2.0) / \log(3.0)$$

여기서, f 는 주파수, S 는 해상상태(Sea State), NA 는 환경 소음을 나타낸다.

4.2.2 능동소나 방정식

$$SE = SL - 2TL + TS - (RL \oplus NL) + DI - DT \quad (4.7)$$

SL은 자함의 능동소나 Pulse 강도를 의미한다. TL과 NL은 수동소나 방정식에 사용된 것과 동일하고 RL은 복반사음(Reverberation Level)으로서 시간에 따라 변화되

는 값이지만 여기서는 일정한 값으로 정의한다. 능동소나 방정식에서는 주변소음을 환경소음과 복반사음의 Power Sum으로 표현하였다. TS는 표적강도로서 주파수와 시선각의 함수이다.

4.2.3 능동 및 수동소나 종류 및 특성

위에서 기술한 소나방정식을 이용하여 표적탐지를 할 경우 음향탐지기의 자체 특성이 고려되어야 한다. 아래는 잠수함에 탑재되는 음향탐지 소나의 종류 및 특성자료를 정의하였다.

1) 수동소나

잠수함에 탑재되는 수동소나는 아래와 같다.

- 함수 소나(CAS; Cylindrical Array Sonar)
- 수동 측거 소나(PRS; Passive Ranging Sonar)
- 선체부착 선배열 소나(FAS; Flank Array Sonar)
- 예인형 선배열 소나(TAS; Towed Array Sonar)
- 인터셉트 소나(IPS; Intercept Passive Sonar)

수동소나의 성능을 나타내는 특성 자료는 아래와 같고, 이는 운용자의 요구조건과 이를 기반으로 도출된 Staff Requirement, 그리고 기보유 장비의 성능자료를 이용하여 입력값을 도출하도록 한다.

- 특성 주파수별 지향지수
- 특성 주파수별 소나 자체 소음

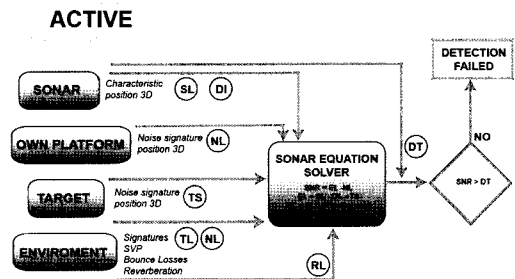


그림 16. 능동소나 방정식 및 탐지 개념도⁸⁾

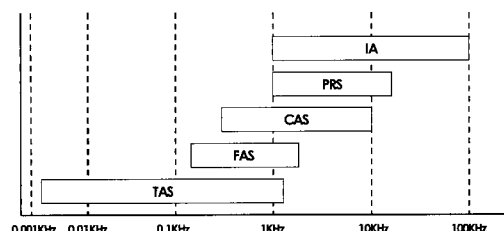


그림 17. 수동소나별 운용 주파수 범위 예

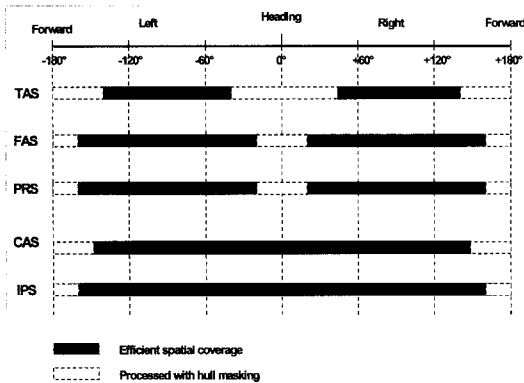


그림 18. 수동소나별 유효탐지 범위 예

- 탐지 한계
- 운용 주파수 범위 : 최소 및 최대 주파수
- 유효탐지범위 : 선수에 대한 상대각도로 정의(Field of View)

2) 능동소나

능동소나의 성능을 나타내는 특성 자료는 아래와 같고 이는 운용자의 요구조건과 이를 기반으로 도출된 Staff Requirement, 그리고 기보유 장비의 성능자료를 이용하여 입력값을 도출하도록 한다.

- 능동소나 Pulse 강도
- 능동소나 Pulse 길이
- 능동소나 Pulse Repetition Time
- 능동소나 Pulse Type
- 능동소나 Pulse 주파수
- 능동소나 주파수에 대한 지향지수
- 유효송수신범위 : 선수에 대한 상대각도로 정의
- 능동소나 주파수에 대한 소나 자체 소음
- 탐지 한계

4.3 스텔스 모델

스텔스 모델도 탐지기 모델과 동일하게 음향스텔스 모델만 고려한다. 음향스텔스 모델은 방사소음 모델과 표적 강도 모델로 구성된다. 방사소음은 함 속도, 주파수, 시선각의 함수로서 현재 함 속도에 대한 주파수 및 시선각의 배열로 합성환경 모델에 제공된다. 표적강도는 함 속도, 시선각의 함수로서 현재 함 속도에 대한 시선각의 배열로 합성환경 모델에 제공된다. 일반적인 수상함 및 잠수함의 방사소음 특성은 그림 19와 같다^[8].

음향스텔스 관련 군 요구조건은 일반적으로 최대 신호준위 값으로 제공되고 잠수함의 설계가 진행되면서 주파

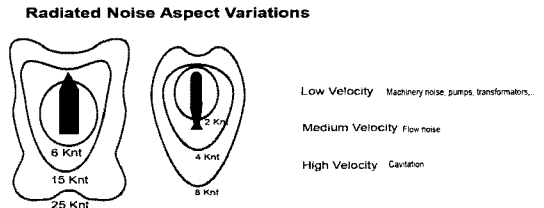


그림 19. 수상함 및 잠수함 방사소음 예

수와 속도, 그리고 시선각에 따른 신호준위를 해석 및 실험을 통해 도출하게 된다. 따라서 음향스텔스 모델은 이러한 값들을 모두 표현할 수 있도록 DB 형식의 데이터 모델로 표현하도록 한다.

4.4 전투체계 모델

전투체계 모델은 각종 센서로부터 전달되는 자료의 처리를 담당하는 전술자료 모델과 발사관/무장 통제를 담당하는 무장운용 모델, 그리고 전술상황 분석 및 통제를 담당하는 교전통제 모델로 구성된다. 전술자료 처리모델에서는 탐지기 모델에 의해 탐지되어진 각종 표적에 대해 미리 정의된 식별 및 표적기동분석 소요시간과 오차를 고려하여 표적 식별 및 기동분석 등의 정보관리를 수행하고 이를 교전통제 모델에 전송한다. 교전통제 모델은 전술정보를 바탕으로 현재 상황을 분석하고 교전, 회피 등의 전술 명령을 전송한다. 구성적 시뮬레이션에서는 교전통제 모델에 전술처리가 포함되어야 한다. 무장운용 모델은 기만기와 중어뢰 발사제어 및 탑재무장 관리를 수행하며 중어뢰 사격제원 계산도 이곳에서 수행된다.

4.4.1 중어뢰 발사제어

임의의 표적에 대한 중어뢰 공격을 계획할 때, 중어뢰 발사를 위한 발사조건 및 운용조건을 설정하는 것을 Presetting 이라 하고, 이 때 전술적인 데이터의 사전 계산을 수행하는 것을 TDC(Torpedo Data Calculation)이라 한다. 표적에 대한 Presetting 시 TDC 자료를 초기값으로 하고, 운용자가 필요 시 이를 수정/설정하여 중어뢰를 발사/운용할 수 있다. 그림 20은 TDC 계산을 위한 기하학적 개념도이다.

임의의 전술상황에서 중어뢰를 이용하여 공격 계획을 세울 때, 표적이 중어뢰의 공격가능거리, 즉 사정거리 내에 존재하는 지를 판단하고 공격가능거리 내에 존재한다면 발사각 범위를 판단하여 공격을 수행하고, 그렇지 않을 경우 표적 추적 또는 공격가능 발사각 범위로 자함 전술기동 수행 후 공격을 수행한다. TDC 계산에 있어서 지정유도 중어뢰(Fire and Forget Torpedo)의 공격 전술로

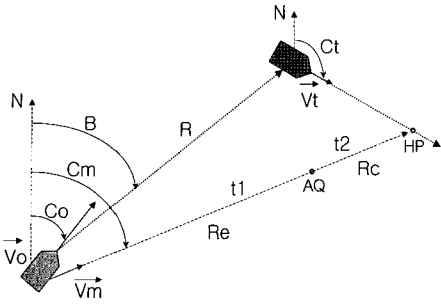


그림 20. TDC(Torpedo Data Calculation) 개념도
여기서,
 V_0 ; 자함 속도(Ownship Speed)
 C_t ; 표적 침로(Target Course)
 C_0 ; 자함 침로(Ownship Course)
 C_m ; 중어뢰 설정 침로(Set Course)
 R ; 표적 거리(Target Range)
 R_e ; 중어뢰 활성화 거리(Enable Range)
 B ; 표적 방위(Target True Bearing)
 R_c ; 중어뢰 요격거리(Intercept Range)
 V_t ; 표적 속도(Target Speed)
 AQ ; Aquisition Point
 HP ; Hit Point

CCM(Collision Course Method)을 사용하고 Collision Point를 Acquisition Point로 하는가 또는 Hit Point로 하는가에 따라 CCMA와 CCMH로 구별할 수 있다. CCMA의 경우 주로 소나를 운용하는 중어뢰 전술로 현재 일반적인 지정유도 어뢰에 사용되고, CCMH는 주로 직주 어뢰에 사용되며 이를 응용하여 연속(동시) 발사(Salvo) 전술에 이용이 가능하다. 여기서는 중어뢰의 속도 모드 및 CCMA에 의한 전술계산 방법에 따른 중어뢰 TDC 계산 알고리즘을 기술한다. 중어뢰가 Acquisition Point에 왔을 때 표적은 Hit Point에 위치하게 되는 것으로서 이를 벡터 형식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\vec{R} + \vec{V}_t \cdot t_1 = \vec{V}_m(t_1 + t_2) \quad (4.8)$$

위 식을 성분별로 분리하여 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} R \cdot \cos B + V_t \cdot t_1 \cdot \cos C_t \\ = V_m \cdot t_1 \cdot \cos C_m + V_m \cdot t_2 \cdot \cos C_m \\ R \cdot \sin B + V_t \cdot t_1 \cdot \sin C_t \\ = V_m \cdot t_1 \cdot \sin C_m + V_m \cdot t_2 \cdot \sin C_m \\ \cos C_m = \frac{R \cdot \cos B + V_t \cdot t_1 \cdot \cos C_t}{V_m(t_1 + t_2)} \end{aligned}$$

$$\sin C_m = \frac{R \cdot \sin B + V_t \cdot t_1 \cdot \sin C_t}{V_m(t_1 + t_2)} \quad (4.9)$$

표적에 대한 속도, 거리, 방위, 침로는 전술자료 모델에서 전달받는 값으로서 정규분포특성을 가지고 평균이 0, 분산이 σ^2 인 오차가 포함된 값이다. 또한 자함의 속도와 침로도 오차를 포함한 값을 전술자료 모델로부터 전달받는다. 시간 t_2 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_2 = R_c / V_m \quad (4.10)$$

R_c 는 중어뢰 최대탐지거리를 초기값으로 가지며, 운용자가 임의의 값을 설정할 수도 있다. V_m 은 요격거리를 향하는 중어뢰의 속도로서 고속 및 혼합 속도 모드에서는 중어뢰의 최대속도, 저속 모드에서는 저속에 해당하는 중어뢰의 속도를 대응시킴으로써 요격거리를 알 수 있다. 속도모드가 혼합인 경우, 어뢰가 고속모드로 전환되는 것은 표적을 탐지한 이후이나 여기서는 최대탐지거리에서 표적이 탐지되는 것으로 가정하였다. 활성화거리를 향하는 시간 t_1 을 구하기 위해서는 위 식을 제곱하여 더함으로써 아래의 이차방정식을 도출할 수 있고, 이를 이용하여 t_1 을 구할 수 있다. 아래 이차방정식의 실근이 존재하는 경우에만 TDC 계산이 가능하다.

$$\begin{aligned} (V_m^2 - V_t^2) t_1^2 + 2 \{ V_m^2 \cdot t_2 - R \cdot V_t \cdot \cos(B - C_t) \} t_1 \\ + V_m^2 \cdot t_2^2 - R^2 = 0 \end{aligned} \quad (4.11)$$

위에서 언급한 TDC 계산 알고리즘에는 중어뢰 발사를 위한 소요시간에 대한 고려를 하지 않았다. 또한 추적을 통해 발사가능 범위의 접근도 전술기동에 관련된 것으로 TDC 알고리즘에서는 고려하지 않았다.

4.4.2 기만기 발사제어

부유식 기만기는 실제로 잠수함과의 직접 연동은 없고 잠수함에서는 부유식 기만기를 발사할 것인지 판단하고 발사하는 절차만 수행한다. 물론 잠수함 전투체계에 TACM(Torpedo Acoustic Counter Measure) 전술도 포함되어 있으나 본 논문에서는 기만기 표준 모델을 참고하여 연계 방안을 정립하였다. 발사상황도 부유식은 기만기 직접 통신도 필요 없으며 전술에서 설정된 발사관을 선택하여 발사한다. 기만기 발사 절차는 발사준비, 발사관 충수, 충수 완료/발사준비, 발사관 머즐도어 개방, 발사이나 일부 잠수함은 미리 충수가 완료되어 있어서 발사준비, 발사관

머즐도어개방, 발사 순으로 진행한다. 교전수준에서는 위와 같은 구체적인 발사절차가 큰 의미를 가지지 않으므로 부유식 기만기의 경우 음향모드 설정과 발사명령만 전달하면 발사가 되는 것으로 설정하였다.

4.5 추진 모델

추진 모델은 추진전지 모델과 추진장치 모델로 구성된다. 추진전지 모델은 속도에 따른 시간당 방전량 DB로 모델링되고, 추진장치 모델은 Level 2 이하에서는 지휘통제 모델의 명령 속도를 수중운동 모델로 바로 전달하는 Dummy 형태가 되고, Level 1에서는 부하에 따라 추진기 회전수가 달라지는 공학적 모델을 사용한다.

5. 잠수함 표준모델 입력 파라메타 및 입·출력 정의

위에서 기술한 잠수함 교전 수준 표준모델의 입력 파라메타와 외부 모델간의 입·출력 자료에 대한 정의를 다음과 같이 기술하였다. 잠수함 모델 S/W 입력 파일에 입력되어 잠수함의 일반 자료 및 개별 모델의 특성을 나타내는 각종 파라메타로서 아래와 같다.

- ▶ 잠수함 일반 자료 : 길이, 폭, 높이, 흘수, 수중/수상 배수량, 수중/수상 최대속도, 최대 운용심도, 어뢰발사관 수
- ▶ 수중운동 모델 : 선화반경, 수평/수직면 Norribin 상수, 요구속도에 대한 가감속 시간, 심도변화에 따른 요구시간, 제어기 이득
- ▶ 탐지기 모델(수동 및 능동)
 - 수동탐지 : F.O.V(Field of View), 수신 주파수 대역, 지향지수, 문턱치
 - 능동탐지 : F.O.V, 송수신 주파수, 지향지수, 문턱치, PRT(Ping Repeation Time) 범위, 송신음 준위, 송신 파형 및 길이
- ▶ 스텔스 모델 : 방사소음 DB, 표적강도 DB
- ▶ 전술자료 모델 : TMA(Target Motion Analysis) 오차, 표적 정보처리 시간, 자함 항법 오차
- ▶ 무장운용 모델 : 무장발사 함 제한조건(속도, 심도, 동요각), 탑재 무장 수, 중어뢰 발사제한각, 무장 발사속도
- ▶ 추진 모델 : 속도별 축전기 소모량
- ▶ 시뮬레이션 시간 간격(Δt)
- ▶ 시뮬레이션 초기 조건 : 위도, 경도, 심도, 침로, 속도 또한, 잠수함 표준 모델 입·출력 변수의 정의는 표 2와 같다.

표 2. 잠수함 표준 모델 입·출력 변수 목록

입력 변수	출력 변수
<ul style="list-style-type: none"> • 작전 환경 <ul style="list-style-type: none"> - 수심(Water Depth; m) - 해상상태 • 객체 초기정보 <ul style="list-style-type: none"> - 객체 ID - 객체 위도(rad) - 객체 경도(rad) - 객체 심도(m) - 객체 속도(knots) - 객체 침로(deg) • 수동 음향정보 <ul style="list-style-type: none"> - 음향표적 ID - Source Level(dB) - Transmission Loss(dB) - Noise Level(dB) • 타 객체 능동소나 음향정보 <ul style="list-style-type: none"> - 음향표적 ID - 표적강도(dB) - 송신 시간(sec) - Noise Level(dB) - Reverberation Level(dB) - Doppler(Hz) - 주파수(kHz) - Pulse Type - Pulse Length(sec) • 자함 능동소나 음향탐지정보 <ul style="list-style-type: none"> - 음향표적 ID - 표적강도(dB) - Noise Level(dB) - Reverberation Level(dB) - Doppler(Hz) • 중어뢰 정보 <ul style="list-style-type: none"> - 객체 ID - 속도모드별 최대주행시간(min) - 속도모드별 최대주행거리(m) - 최대 탐지거리(m) - 저속모드 속도(knots) - 고속모드 속도(knots) - 최대 운용심도(m) • 부유식 기만기 정보 <ul style="list-style-type: none"> - 객체 ID - 기만기 음향모드 - Masker 모드 송신음압(dB) - 기만기 최대운용심도(m) • 피격 정보 <ul style="list-style-type: none"> - 객체 ID - 피격 신호 	<ul style="list-style-type: none"> • 잠수함 상태 정보 <ul style="list-style-type: none"> - 아함 ID - 잠수함 제원(L×B×D; m) - 잠수함 위도(rad) - 잠수함 경도(rad) - 잠수함 심도(m) - 잠수함 속도(knots) - 잠수함 침로(deg) - 잠수함 종동요각(deg) - 잠수함 횡동요각(deg) • 능동소나 Pulse 정보 <ul style="list-style-type: none"> - 아함 ID - Pulse 송신 flag - Pulse 송신 시간(sec) - Pulse Repetition Time(sec) - 송신 Power(dB) - Pulse 주파수(kHz) - Pulse Type - Pulse Length(sec) • 피탐지 정보 <ul style="list-style-type: none"> - 피탐지정보 송신 시간(sec) - 방사 소음 세기(dB) - 표적 강도 세기(dB) • 무장통제 정보 <ul style="list-style-type: none"> - 아함 ID - 중어뢰 Power On - 중어뢰 입력장치 데이터 <ul style="list-style-type: none"> ○ 발사대상 ○ 속도형태 ○ 음향형태 ○ 탐색형태 ○ 활성화거리(m) ○ 접촉예상거리(m) ○ 최대/최소 탐색심도(m) ○ 최대/최소 심도제한값(m) - 중어뢰 발사 신호 - 부유식 기만기 음향모드 - 부유식 기만기 발사 신호

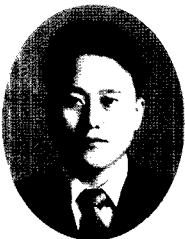
6. 결 론

본 논문에서는 미래의 수중 교전 시뮬레이션에서 공통적으로 사용될 수 있도록 재사용성 및 상호운용성과 공학 시뮬레이션 등 앞으로의 확장성을 고려하여 수중 교전에 사용되는 잠수함 체계에 대한 표준모델을 어떠한 개념에서 어떠한 형태로 정립할 것인가에 대해 기술하였다. 교전 수준 잠수함 체계 표준모델에 대한 모델아키텍처를 정립하고 개별 구성요소에 대한 모델링 방안을 개발하였으며 모델의 입출력 자료 및 정보 흐름도를 도출하였다. 특히 체계 효과도 분석은 체계 사양에 따라 달라지는 MOE (Measure Of Effectiveness)를 평가하는 작업이므로 체계 주요변수만으로 표준 모델이 구성되게 하여 다른 파라미터에 영향을 받지 않도록 하였다.

본 논문에서는 비음향 탐지 모델 및 비음향 스텔스 모델 등 수중 교전에 해당하지 않는 분야는 제외하였으므로 향후 이에 대한 추가 연구가 필요하고, 공학모델과의 연계와 다양한 성분작전이 가능하도록 모델의 지속적인 확장과 보완이 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 김찬기 (2002), *국방 M&S 개념연구*, NSDC-519-020162, 국방과학연구소 기술보고서.
2. DoD 5000.59 (1995), *Modeling and Simulation(M&S) Master Plan*.
3. 이정구 (2001), *무기체계 획득과정에서의 M&S에 관한 조사 연구*, RDPD-415-010690, 국방과학연구소 기술보고서.
4. TNO-FEL (1994), *Maritime Operations Research into Submarine Evaluations(MORSE) Model Descriptions*, Netherlands.
5. 이심용, 나영인, 남경원 (2001), *HILS 시스템 연동 표적함 시뮬레이터 개발*, NSDC-519-010416, 국방과학연구소 기술 보고서.
6. EDS Defence Limited (1993), *THOR - Torpedo Engagement Simulation Model*.
7. 박준규 (2002), “*잠수함 임무별 운용 시뮬레이션 소요 모델링 연구*”, NSDC-513-020704, 국방과학연구소 기술보고서.
8. SINDEL (2003), *Anti Submarine Warfare Team Training Simulator Preliminary Design Review*.
9. HDW Lecture Note (2005), *Combat System Performance Analysis and Prediction Model*.



김 동 훈 (kdh9899@add.re.kr)

1999 부산대학교 조선해양공학과 학사
 2001 부산대학교 조선해양공학과 석사
 2001 ~ 현재 국방과학연구소 제6기술연구본부 선임연구원

관심분야 : 모델링&시뮬레이션(M&S), 수중운동체 동력학



신 지 환 (naraboja@add.re.kr)

1997 부산대학교 항공우주공학과 학사
 1999 부산대학교 항공우주공학과 석사
 1999 ~ 2002 한국전기연구원 메카트로닉스연구그룹 위촉연구원
 2002 ~ 2006 한국항공우주산업(주) T-50비행제어팀 선임연구원
 2006 ~ 현재 국방과학연구소 제6기술연구본부 연구원

관심분야 : 수중운동체, 모델링&시뮬레이션(M&S), 조종안정성



김 찬 기 (ckkim@add.re.kr)

1986 서울대학교 조선해양공학과 학사
 1988 서울대학교 조선해양공학과 석사
 1996 서울대학교 조선해양공학과 공학박사
 1990 ~ 현재 국방과학연구소 제6기술연구본부 책임연구원

관심분야 : 모델링&시뮬레이션(M&S), 수중운동