

교전수준 어뢰체계 표준모델 개발 방안 연구

신지환[†]

On the Development of Authoritative Representations of Torpedo Systems for Engagement Level Simulation

Ji-hwan Shin

ABSTRACT

We considered the authoritative representations of torpedo systems that was the engagement level model to develop system specifications and to analyze operational requirements on concept design phase. The Work Breakdown Structure(WBS) of models was defined about authoritative representations of the torpedo systems. The communication of information among each subsystems and input/output parameters were defined. In the heavy weight and light weight torpedo model, presetter, underwater maneuver, war head, sonar, guidance and control, propulsion subsystem modeling were developed for heavy-weight and the light-weight torpedo systems. The authoritative representations of torpedo systems have similar structures with those of the engineering level models and could be verified via engagement level simulations according to the V&V process in the future.

Key words : Torpedo system, Underwater engagement, Modeling and simulation(M&S)

요약

무기체계의 개념설계 단계에서부터 체계 사양 도출 및 군 요구분석의 효과적인 수행을 위한 교전수준(Engagement Level)의 M&S(Modeling & Simulation) 적용을 위해 수중무기체계인 어뢰체계의 표준모델을 구성하였다. 추후 수중 교전 시물레이션에 공통적으로 사용될 수 있도록 재사용성(Reusability)과 상호운용성(Interoperability) 및 공학 모델로의 확장성을 고려하였다. 어뢰체계의 표준에 대하여 모델의 WBS(Work Breakdown Structure)를 정의하고 각 하부 모델들 사이의 정보 흐름을 구체화하여 모델간의 입력 및 출력 파라미터를 정의하였다. 어뢰 모델링은 WBS의 하부 모델 중에서 초기입력 장치, 수중운동, 전투 탄두, 음향탐지, 유도제어, 추진동력에 대해서 모델링 하였으며, 중어뢰와 경어뢰의 운용상의 차이점을 구분하여 모델링하였다. 표준모델은 가능한 공학 수준 M&S와 동일한 구조를 갖도록 하였으며 앞으로 정립될 V&V(Verification & Validation) 절차에 따라 교전 시물레이션에 사용될 다른 체계들과 검증될 것이다.

주요어 : 어뢰체계, 수중 교전, 모델링 & 시물레이션

1. 서론

무기체계를 효과적으로 개발하기 위해서는 체계개발 초기단계부터 군요구나 무기체계 효과도를 분석하여 군요구의 적절성 검토와 무기체계 사양이나 부체계 사양의 도출 및 적절성 검토가 지속적으로 수행될 것이 요구되는

데, 이를 위하여 무기체계에 대한 교전수준(Engagement Level)의 M&S(Modeling and Simulation)를 사용하는 것이 일반적인 접근법이다. 그러나 기존의 조사결과¹⁾에 따르면 무기체계의 연구개발에 교전수준의 M&S를 적용하고 있는 경우는 극히 제한적임을 알 수 있다. 따라서 무기체계 연구개발에 있어 교전수준 M&S의 적용을 활성화하기 위한 대책 중의 하나로 무기체계 표준 모델(Authoritative Representations of Weapon Systems)을 정립할 필요가 있다.

무기체계 표준 모델 정립 필요성에 대해 보다 구체적으로 살펴보면, 군요구 분석이나 체계효과도 분석은 체계

2007년 6월 18일 접수, 2007년 7월 30일 채택

¹⁾ 국방과학연구소 제2체계개발본부 특수합정체계부 2팀

주 저 자 : 신지환

교신저자 : 신지환

E-mail: naraboja@add.re.kr

개발 초기단계에서부터 수행되어야 하는데, 체계개발 사업 준비 기간이나 인력 등의 부족으로 이를 위한 교전수준 M&S를 구성하는 데 어려움을 겪고 있는 것이 현실이다. 재사용성(Reusability)과 상호운용성(Interoperability)을 갖는 대표적인 모델들이 미리 확보되어 있다면 체계개발 착수와 동시에 이들을 사용하여 교전수준의 M&S를 구성할 수 있을 것이다. 기존의 개념으로는 체계개발 초기에 자원과 시간을 투입하여 교전수준의 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 있어 동일한 사건을 시뮬레이션 한 결과가 서로 달라질 수 있어 효과도 분석의 일관성이 유지되기 어려운 문제점이 있다. 따라서 미국의 국방 M&S 기본계획^[2]에 기술된 바와 같이 무기체계 표준 모델의 개발이 시급히 요구된다.

본 논문에서는 어뢰체계 효과도 분석용 프로그램인 SOPA(Torpedo System OPERational Analysis)^[3]를 기반으로 중어뢰 및 경어뢰에 대한 교전수준 표준 모델을 정립하였다. 체계 효과도 분석은 체계 사양에 따라 달라지는 특정한 MOE(Measure Of Effectiveness)를 도출하는 작업이므로 체계 사양만으로 표준 모델이 구성되게 하여 결과가 다른 상세 파라미터에 영향을 받지 않도록 하였다. 교전수준의 M&S도 LVC(Live, Virtual & Constructive) 개념에서 중장기적으로 공학 수준(Engineering Level)의 M&S와도 연동될 수 있어야 하므로 본 연구에서 기술된 표준 모델들은 가능한 한 TORSIM(TORpedo SIMulation)^[4] 등의 공학 수준 M&S와 동일한 구조를 갖도록 하였다.

2. 표준 모델 개발 원칙

수중무기체계 표준 모델들은 미래의 수중 교전 시뮬레이션에서 공통적으로 사용될 수 있도록 재사용성 및 상호운용성을 보장하고 공학 시뮬레이션 등 앞으로의 확장성을 고려하여 정립하는 것을 기본 원칙으로 하며, 다음과

같은 원칙에 따라 개발되었다.

- ▶ 수중무기체계 모델들은 상세도 수준(Level of Detail)에 따라 Level 1과 Level 2로 구분한다. Level 1은 공학 수준 모델로서 상세설계 단계에서 구성품 등의 상세 사양을 도출하기 위한 모델이다. Level 2는 교전수준 모델로 개념설계 단계부터 체계사양 도출 및 군 요구분석을 위한 모델이다.
- ▶ 기본적으로 본 연구에서의 표준 모델이라 함은 Level 2를 의미한다.
- ▶ S/W는 C나 C++와 용이하게 연동될 수 있는 C 언어를 사용하여 작성하여 HLA로 연동한다.
- ▶ 표준 모델은 사건 구동(Event Driven)이 아닌 시간 간격 구동(Time-Step Driven)으로 개발함을 기본으로 한다.
- ▶ 표준 모델은 해당 무기체계 시뮬레이터에 탑재되어 운용될 수 있는 가상(Virtual) 시뮬레이션 모델을 기준으로 작성된 후에 구성적(Constructive) 시뮬레이션을 고려하여 확장된다.
- ▶ 수중무기체계 모델에는 구성적 시뮬레이션을 위하여 입력 파일 형태의 초기 입력 장치 기능이 포함된다.

3. 어뢰체계 표준 모델

어뢰 표준 모델은 체계개발 사업에서 개발된 효과도 분석 S/W인 SOPA를 3차원으로 확장시키고 여기에 체계 시뮬레이션 S/W인 TORSIM 개념을 혼합하여 구성한다. 여기에서는 지정유도 어뢰(Fire & Forget Torpedo)에 대한 표준 모델로 연구범위를 제한하였다.

3.1 어뢰 표준 모델의 WBS

어뢰 표준 모델은 수중 교전 시뮬레이션에서 공학 모델과 대체되어 다른 교전수준 모델들과 연동될 수 있도록 어뢰체계의 표준모델은 다음의 그림 1과 같은 WBS를 갖도록 구성된다.

3.2 정보 흐름도

어뢰 초기 입력 장치에서 어뢰 모델로 전달되는 정보는 다음 표 1과 같으며, 중어뢰와 경어뢰 대부분 유사하나 몇 가지 운용상의 차이점이 발생할 수 있다. 활성화 거리, 발사각 및 접촉 예상 거리는 초기 입력이나 TDC(Target Data Calculation)중 하나를 선택할 수 있다. 구성적(constructive) 시뮬레이션의 경우 TDC 결과 사용을 원칙으로 한다.

1) SOPA : 개념 설계 단계에서 사용되는 어뢰의 주요 사양을 간략하게 모델링하여 주요 매개변수들의 영향을 살펴보는 프로그램
 2) TORSIM : 어뢰 체계의 모든 구성부들을 상세 모델링하여 체계 성능을 평가하고 세부사양을 검토하는 체계시뮬레이션 프로그램

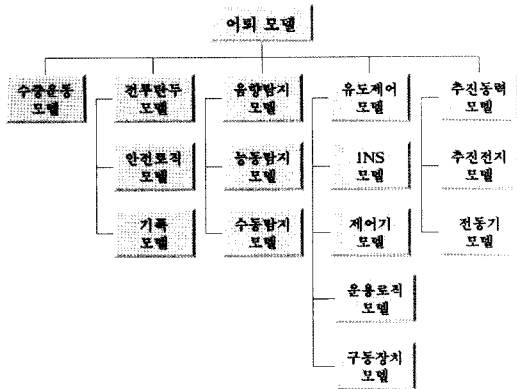


그림 1. 어뢰체계 표준모델의 WBS

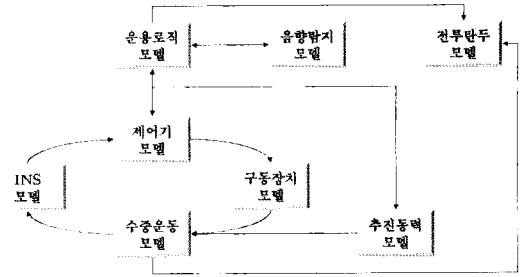


그림 2. 어뢰체계 표준모델 정보 흐름도

표 1. 초기입력 장치에서 어뢰 모델 전달 정보

	중어뢰	경어뢰
발사대상	잠수함, 수상함	잠수함
속도형태	저속, 고속, 혼합	저속, 고속, 혼합
음향형태	능동, 수동	능동, 수동
탐색형태	사형	사형
	빔조향	빔조향
	직주원형	직주원형 ¹⁾
	직주나선형	직주나선형 ²⁾
활성화거리	100m~최대 주행거리	100m~최대 주행거리 ³⁾
접촉예상거리	100m~최대 주행거리	100m~최대 주행거리 ⁴⁾
탐색심도	5m~최대 운용심도	5m~최대 운용심도
심도제한	최대 및 최소 심도 제한	최대 및 최소 심도 제한
발사각	+60° ~ -60°	+90° ~ -90°
발사명령	○	○

^{1,2)} 항공기 및 헬기 발사 경우 원형(천해), 나선형(심해)

^{3,4)} 항공기 및 헬기 발사 경우 해당사항 없음

어뢰체계 표준모델의 WBS에 따라 나누어진 하부 모델들 사이의 정보의 흐름은 다음 그림 2와 같다.

운용로직 모델에서 전투탄두 모델로 전투탄두의 활성/비활성 명령이 전달되며 운용로직 모델로부터 제어기 모델로 제어기 작동 명령, 속도명령, 심도명령, 종동요/수평동요각 명령, 각속도 명령이 전달된다. 그리고, 음향탐지 모델로 전달되는 정보는 음향탐지 활성/비활성 명령, 음향탐지 형태(능동, 수동), PRI(Ping Repeating Interval)이다. 또한, 추진동력 모델로는 추진기 작동 명령과 속도명령이 전달된다.

음향탐지 모델에서 운용로직 모델로 가는 정보는 표적 정보와 Masker 정보로 나눌 수 있으며, 탐지 여부 및 시선각의 정보 이다. 추진동력 모델에서 수중운동 모델로 전달되는 정보는 Level 1인 경우에는 추진기 회전수(RPM)이 되고 Level 2인 경우는 속도 명령이다. 제어기 모델에서 구동장치 모델로 전송되는 정보는 Level 1인 경우에는 승강타각(Elevator) 명령 및 방향타각(Rudder) 명령이며, Level 2인 경우에는 바이패스 된다. 구동장치 모델에서 수중운동 모델로 전송되는 정보는 승강타각 및 방향타각이며 Level 2인 경우에는 바이패스 된다. 수중운동 모델은 심도 및 상태변수(속도, 각속도, Euler 각)를 관성항법장치 모델로 전달한다. 관성항법장치 모델에서 운용로직 및 제어기 모델로 전달되는 정보는 Level 1인 경우 계측 심도 및 계측 상태변수가 되지만, Level 2의 경우는 바이패스 된다.

3.3 모델 입력 파라미터 및 입출력 정의

어뢰 모델 S/W 입력 파일에 기술되는 파라미터는 다음과 같다.

- ▶ 어뢰 일반 자료 : 중량, 길이, 직경, 부력
- ▶ 체계 사양

- 속도 : 저속, 고속
- 최대 주행시간 : 저속, 고속
- 최대 주행거리 : 저속, 고속
- 최대 운용심도
- 직주 탐색 형태 : 사형, Beam 조향

- ① 중어뢰 및 경어뢰의 수상함 발사 : 사형, 빔조향
- ② 경어뢰의 항공기 및 헬기에서 발사 : 해당사항 없음

- ▶ 비직주 탐색 형태

- ① 중어뢰 및 경어뢰의 수상함 발사 : 해당사항 없음

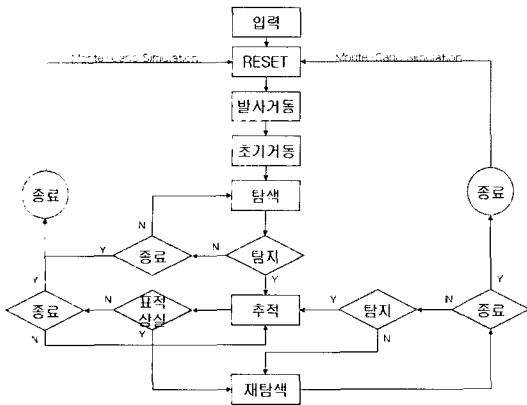


그림 3. 어뢰체계 시뮬레이션 순서도

② 경어뢰의 항공기 및 헬기에서 발사: 원형(천해), 나선형(심해) 탐색

- ▶ 근접센서 작동거리(중어뢰만 해당)
- ▶ 유도제어부 사양
 - ▶ 유도제어부 작동 시간 간격(Frame Time)
 - ▶ 관성항법장치 오차 : Random Error, Bias Error, Scale Factor
- ▶ 음향탐지부 사양
 - ▶ 최대/최소 PRI
 - ▶ Beam 폭(3dB 기준)
 - ▶ Beam 조향각
 - ▶ 송수신 주파수
 - ▶ Masker 수신주파수
 - ▶ 음향송수신 장치 제한
 - ▶ 문턱치(threshold)
- ▶ 초기 입력의 default
- ▶ 시뮬레이션 시간 간격 Δt
- ▶ 초기 위치 및 초기 상태변수
- ▶ Level 2에서의 추가 입력치
 - ▶ 조종계수 혹은 형상 자료
 - ▶ 초기 승강타각 및 방향타각

3.4 입출력 변수 정의

입력 및 출력 변수의 정의는 다음 표 2와 같이 정리될 수 있다.

3.5 모델링 방안

1) 초기 입력 장치 모델

초기 입력 장치는 어뢰의 초기 입력 변수들을 설정하는 장치이다. 초기 입력 장치는 가상 시뮬레이션에서는 H/W

표 2. 어뢰 입출력 변수

입력 변수	출력 변수
• 작전 환경	• 어뢰 정보
-수심(m)	-어뢰 ID
-해상상태	-객체 위도(rad)
• 객체 정보	-객체 경도(rad)
-객체 ID	-객체 심도(m)
-객체 위도(rad)	-객체 속도(m/sec)
-객체 경도(rad)	-객체 침로(deg)
-객체 심도(m)	• 능동소나 펄스 정보
-객체 속도(m/sec)	-어뢰 ID
-객체 침로(deg)	-펄스 송신 시간(sec)
• 수동 음향정보	-송신 Power(dB)
-음향표적 ID	-펄스 주파수(kHz)
-표적 신호 수신 준위(dB)	-펄스 형태
-주변 소음 준위(dB)	-펄스 길이(sec)
• 능동 음향정보	• 수동소나 정보
-음향표적 ID	-어뢰 ID
-표적 신호 수신 준위(dB)	-수신 주파수
-주변 소음 준위(dB)	• 피탐지 정보
-반향음 준위(dB)	-피탐지 정보 송신 시간(sec)
-도플러(Hz)	-방사 소음 세기(dB)
-주파수(kHz)	• 주행상태
-펄스 형태	-발사
-펄스 길이(sec)	-기록
	-비정상 주행 종료

로 구현되어 일반적인 지정유도 어뢰의 입력 장치를 모사하여 초기 변수들을 입력하는 기능을 갖고, 구성적 시뮬레이션에서는 발사 형태만 수신 받아 설정되어 있는 애초 값을 사용하여 초기 입력 장치를 거치지 않고 발사하는 기능을 갖도록 모델링된다. 표적 정보를 추정하는 TMA (Target Motion Analysis) 자료는 발사 플랫폼으로부터 수신 받고, 초기 입력 장치 모델의 일부로서 포함되어 있는 TDC 모델을 사용하여 발사 정보를 계산한다. 이와 관련된 TDC 모델은 부록 1에 기술되어진 바와 같다.

2) 수중운동 모델

수중운동 모델은 Level 2에서의 질점 모델과 Level 1에서의 운동방정식 모델로 구분된다. 즉, Level 2에서는 운동로직에서 발생하는 선회각속도 등의 제어 명령과 동일하게 동작하는 질점 모델이 사용되고, Level 1에서는 형

상 자료나 조종계수의 입력을 사용하는 선형이나 비선형 운동방정식^[5]이 사용되는데, 영상 자료가 입력되는 경우에는 경험식^[6,7]을 사용하여 조종계수를 도출하며, 발사관 내 운동 모델을 포함한다. 어뢰의 표준모델에서 사용되는 수중운동에 대한 질점 모델은 부록 2와 같다.

3) 전투탄두 모델

전투탄두 모델에 손상 정도를 분석하는 모델을 포함하지 않지만 안전로직 모델로 중어뢰의 활성화 이후에만 기폭하는 모델과 중어뢰 및 표적의 상대거리를 계산하여 근접자기 센서(탐지 거리 5m)나 충격 센서가 작동하게 하는 모델로 구성된다.

4) 음향탐지 모델

Level 2의 음향탐지 모델은 다음에 기술된 소나 방정식^[6]을 기본으로 한다. 능동탐지방식의 대한 소나 방정식은 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned}
 EL &= SL + TS - (TL_t + TL_r) + (BL_t + BL_r) \\
 RL &= SL - (TL_t + TL_r) - DI + S_v + 10\log\left(\frac{c\tau}{2}r^2\right) \\
 NL &= \text{Noise} + 10\log(BW) \\
 TNL &= 10\log(10^{RL/10} + 10^{NL/10})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, EL은 표적 방향 준위, RL은 복반사음 준위, NL은 음향탐지부에서의 주변소음준위, TNL은 음향탐지부가 느끼는 복반사음과 주변소음이 합쳐진 전체 소음준위를 의미하며 단위는 dB이다. SL은 음원 준위, TS는 표적의 세기, TL는 전달 손실, BL은 빔 손실, DI는 방향성 지수, S_v는 산란 체적, c는 음파속도(1,500m/sec), τ는 펄스의 길이, r은 표적과 어뢰 사이의 거리, Noise는 환경에 따른 소음준위를 나타내고, BW는 대역폭을 나타낸다. 또한 하첨자 t는 송신 순간을 의미하며 r은 수신 순간을 의미한다.

음향탐지 모델은 무기체계로부터 표적 강도를 수신 받고 환경 모델로부터 전달 손실과 반향음 준위 및 주변 소음 준위를 수신 받으며 신호처리 모델에서는 반향음 준위와 주변 소음을 dB 단위로 합산하여 수신 밴드 대역을 고려한 전체 소음 준위를 계산하고, 표적 강도를 고려한 표적신호 수신 준위에 송수신 빔 손실을 고려한 값이 전체 소음준위 보다 문턱치 이상 큰 경우(CW 방식에서는 도플러도 일정 값 이상인 경우)에 탐지된 것으로 간주한다. 탐지가 되면 기하학적으로 계산된 시선각과 표적 거리에 오차를 포함시켜 탐지된 시선각과 표적 거리를 생성한다.

여러 개의 표적이 탐지된 경우 거리 Window를 사용하여 이전 펄스에 탐지된 표적을 추적하고, 이전 펄스에 탐지된 표적이 없는 경우는 가장 근접한 표적을 추적한다.

빔 손실은 음향전환장치의 소자 배열 및 각 소자의 가중치에 따라 형태가 달라지는데, 초기 설계 단계에서 소자 배열이나 가중치를 알 수 없으므로 다음과 같이 주빔폭에 대한 함수로 표현한다.

$$BL = 10\log\left[\left|\frac{\sin(x\pi)}{x\pi}\right|\cos\left(\frac{\bar{\theta}}{2}\right)\right] \left(0^\circ < \theta < 180^\circ\right) \tag{2}$$

여기서, θ가 수평 혹은 수직 시선각이고 α가 빔 편향각(beam steering angle)이라고 할 때 $\bar{\theta} = \theta - \alpha$ 이고 θ₀가 주빔폭이라고 할 때 $x = \theta/\theta_0$ 이다. 주빔폭이 15°라 할 때 식 (2)에 의한 빔 손실은 그림 4와 같이 계산되는데, 이와 같은 빔은 -3dB 빔 폭이 약 18°가 된다. 그림 4를 살펴보면 식 (2)를 사용하여 측면 로브(side lobe)까지 존재하는 실제 빔 패턴과 유사한 형태로 묘사할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 주빔이 편향된 경우에 대해서도 빔 손실을 추정할 수 있다. 그림 5는 20°로 빔이 편향된 경우에 대한 빔 손실을 도시한 것이다.

수동에 대한 소나 방정식은 다음과 같이 기술된다.

$$TaS = TS - TL_r + BL_r \tag{3}$$

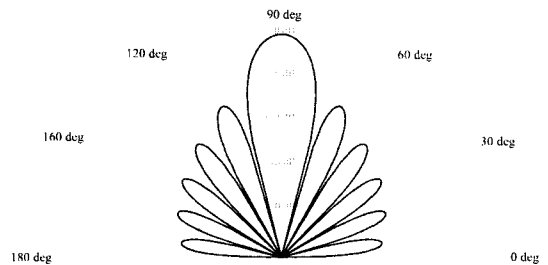


그림 4. 시선각에 따른 빔 손실(빔 편향 0°)

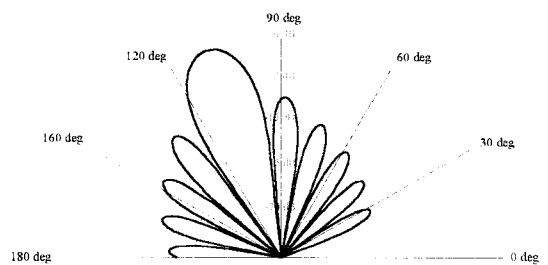


그림 5. 시선각에 따른 빔 손실(빔 편향 20°)

수동 모델에서는 표적 방사 소음 TS를 무기체계에서 수신 받고 전달 손실과 주변 소음 준위를 환경 모델로부터 수신 받으며, 신호처리 모델에서는 표적 신호 수신 준위 TaS가 주변 소음 준위 보다 문턱치 이상 큰 경우에 탐지가 된 것으로 간주한다. 탐지가 되면 기하학적으로 계산된 시선각에 오차를 포함시켜 탐지된 시선각을 계산한다.

5) 유도제어 모델(중어뢰)

중어뢰의 유도제어 모델은 제어기 모델, 관성항법장치 모델, 구동장치 모델 및 운용로직 모델로 구성된다. 제어기 모델은 Level 2의 경우 운용로직 모델에서 발생한 유도명령을 수중운동 모델로 바로 전달시켜주는 Dummy 형태이다. 관성항법장치(Inertia Navigation System) 모델은 실제 상태변수에 측정 오차를 추가하는 모델로서 편향 오차(Bias Error), 누적 계수(Scaling Factor) 및 랜덤 오차(Random Error)로 구성된다. 구동장치 모델은 Level 2에서는 운용로직 모델의 유도명령을 수중운동 모델로 바로 전달하는 Dummy 형태이다. 운용로직 모델은 다음과 같은 흐름으로 구성된다.

- ▶ 발사 명령이 수신되면 Level 1에서는 추진기 회전 수 변화 및 발사관 내 유동 특성에 따라 속도가 증가하며, Level 2에서는 설정된 명령 속도로 발사 즉시 변경된다.
- ▶ Level 1에서는 어뢰 속도가 12kts 이상(주행안전 스위치 작동)이 되는 순간부터 제어기 작동을 시작한다.
- ▶ 활성화(enable) 전까지 명령 심도 및 방위로 이동하여 이를 유지한다.
- ▶ 어뢰가 활성화되면 탄두부에 활성화 명령을 전달하고 음향탐색을 시작한다.
 - ▶ 탐지 전까지 사형이나 Beam 탐색을 수행하고, 직후 원형의 경우 사형이나 Bean 탐색을 수행하다가 접촉 예상 거리를 주행한 후에는 심도제한(100m 기준)에 따라 원형이나 나선형 탐색을 수행한다. 단, 나선형 탐색은 45° 하강과 3° 상승으로 구성되는데, 하강 시에는 음향탐색을 하지 않는다.
- ▶ 선회각속도
 - 수동 : 6°/sec(사형 탐색), 12°/sec (원형 및 나선형 탐색)
 - 능동 : int(Beam 폭/PRI+0.5)
- ▶ Beam 조향 시간 간격은 PRI와, 조향 각도는 Beam 폭과 동일하다.
- ▶ 사형 탐색 주기는 5초로 한다.
- ▶ 직후 어뢰의 경우 음향탐색을 하지 않고 5m 심도

와 명령 방위를 유지한다.

- ▶ 어뢰 심도가 심도제한 범위를 벗어나면 탄두부에 비활성화 명령을 준다.
- ▶ 표적을 탐지하면 다음과 같은 유도이득을 같은 비례 유도(Proportional Guidance)로 추적하며, Notch Filter에 의한 표적 상실은 무시한다.
 - 수동 : $1/\Delta tgc$ (유도제어부 frame time)
 - 능동 : $1/PRI$
- ▶ 능동의 경우 표적 추적 시 표적 거리에 따라 다음과 같이 PRI를 조정한다.
 - $PRI = 2 \times \text{표적거리} \div \text{음속}(1,500\text{m/sec}) + 0.15[\text{초}]$
- ▶ 능동 탐색 중 Masker만을 탐지하고 능동표적을 탐지하지 못하면 수동으로 Masker를 통과(Burn-through)한 후 최대 PRI 및 이에 해당하는 선회각속도로 원형이나 나선형 탐색을 수행한다.
- ▶ 근접(Close-In) 전에 표적을 상실했으면 초기 탐색형태 유지하고, 근접 후에 표적을 상실했으면 표적상실 위치에서 상실 PRI로 원형 및 나선형 탐색을 1회 수행한 후 설정심도로 이동하여 초기 PRI로 원형 및 나선형 탐색을 수행한다.

6) 유도제어 모델(경어뢰)

경어뢰의 유도제어 모델은 제어기 모델, 관성항법장치 모델, 구동장치 모델 및 운용로직 모델로 구성된다. 제어기 모델은 Level 2의 경우 운용로직 모델에서 발생한 유도명령을 수중운동 모델로 바로 전달시켜주는 Dummy 형태이고, Level 1은 조중계수에 따라 자동으로 설정되는 제어이득을 사용하여 구성된 PID 제어기 모델이다. 관성항법장치 모델은 실제 상태변수에 측정 오차를 추가하는 모델로 편향 오차, 누적 계수 및 랜덤 오차로 구성된다. 구동장치 모델은 Level 2에서는 운용로직 모델의 유도명령을 수중운동 모델로 바로 전달하며, Level 1에서는 작용 부하와 구동 제어기, 구동 전동기 모델로 구성된다. 운용로직 모델은 아래와 같은 흐름으로 구성된다.

- ▶ 경어뢰가 입수한 후 추진전동기가 작동하면 낙하산이 분리되며, 활성화전까지 명령 심도 및 방위로 이동하여 이를 유지한다.
- ▶ 어뢰가 활성화되면 탄두부에 활성화 명령을 전달하고 음향탐색을 시작한다.
 - ▶ 비직주 탐색의 경우 그 자리에서 원형이나 나선형 탐색을 하고, 직주 탐색의 경우 사형이나 Bean 탐색을 수행하다가 접촉 예상 거리를 주행한 후에는 심도제한(100m 기준)에 따라 원형이나 나선형 탐

색을 수행한다. 단, 나선형 탐색은 45° 하강과 3° 상승으로 구성되는데, 하강 시에는 음향탐색을 하지 않는다.

- 선회각속도 : $\text{int}(\text{Beam 폭}/\text{PRI}+0.5)$
- Beam 조향 시간 간격은 PRI와, 조향 각도는 Beam 폭과 동일하다.
- 사형 탐색 주기는 5초로 한다.
- 직주 어뢰의 경우 음향탐색을 하지 않고 5m 심도와 명령 방위를 유지한다.
- 어뢰 심도가 심도제한 범위를 벗어나면 탄두부에 비활성화 명령을 준다.
- ▶ 표적을 탐지하면 다음과 같은 유도이득($1/\text{PRI}$)을 같은 비례율도로 추적하며, Notch Filter에 의한 표적 상실은 무시한다.
- ▶ 추적 시 표적 거리에 따라 다음과 같이 PRI를 조정한다.
 - $\text{PRI} = 2 \times \text{표적거리} \div \text{음속}(1,500\text{m/sec}) + 0.15[\text{초}]$
- ▶ 탐색 중 Masker만 탐지하고 능동표적을 탐지하지 못하면 수동으로 Masker를 통과(Burn-through)한 후 최대 PRI 및 이에 해당하는 선회각속도로 원형이나 나선형 탐색을 수행한다.
- ▶ 근접 전 표적을 상실했으면 초기 탐색형태 유지하고, 근접 후에 표적을 상실했으면 표적상실 위치에서 상실 PRI로 원형 및 나선형 탐색을 1회 수행한 후 설정심도로 이동하여 초기 PRI로 원형 및 나선형 탐색을 수행한다.

7) 추진동력 모델

추진동력 모델은 추진전지 모델과 전동기 모델로 구성된다. 추진전지 모델은 속도에 따른 최대 주행시간으로 모델링되고, 전동기 모델은 Level 2에서는 운용로직 모델의 명령 속도를 수중운동 모델로 바로 전달하는 Dummy 형태이고, Level 1에서는 부하에 따라 추진기 회전수가 달라지는 공학적 모델을 사용한다.

4. 결 론

무기체계의 효과적인 개발을 위한 교전수준 M&S의 적용을 위하여 어뢰체계에 대한 무기체계 표준모델(Authoritative Representations of Weapon Systems)을 정립하였다. 어뢰체계의 표준 모델들은 미래의 수중 교전 시뮬레이션에 공통적으로 사용 될 수 있도록 재사용성, 상호운용성

및 공학 모델로의 확장성을 고려하였다. 모델들의 상세도 수준은 개념설계 단계에서부터 체계 사양 도출 및 군 요구 분석을 위한 교전수준 모델인 Level 2로 고려하였으며, 어뢰체계의 표준에 대하여 모델의 WBS를 정의하고 각 하부 모델 사이의 정보 흐름을 구체화 하며 모델 입출력 파라미터를 정의하였다. 어뢰체계 모델링에서는 WBS 상의 하부 모델중에서 초기입력 장치, 수중운동, 전투탄두, 음향탐지, 유도제어, 추진동력에 대해서 모델링 하였다. 본 연구에서 기술된 표준 모델들은 가능한 공학 수준 M&S 와 동일한 구조를 갖도록 하였고 개발된 수중무기 표준 모델들은 앞으로 정립될 V&V 절차에 따라 검증되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 이정구 (2001), *무기체계 획득과정에서의 M&S에 관한 조사연구*, RDPD-415-010690, 국방과학연구소 기술보고서.
2. DoD 5000.59 (1995), *Modeling and Simulation (M&S) Master Plan*.
3. 김찬기, 안창범 (1997), *수중운동체의 운동방정식과 좌표계 (2)*, NWSD-519-971654, 국방과학연구소 기술보고서.
4. 김찬기, 김진 (1992), *어뢰 선형 운동방정식내의 안정성계수 추정*, NWSD-513-92701C, 국방과학연구소 기술보고서.
5. 김찬기, 안창범 (1993), *어뢰의 비선형 조종 계수 추정을 위한 경험식*, NWSD-519-990199C 국방과학연구소 기술보고서.
6. Robert J. Urick (1983), *Principles of Underwater Sound*, Mcgraw-Hill Book Company.
7. 김찬기, 박정기 (2000), *낙하산 수확모형에 따른 경어뢰의 운동 궤적 비교 연구*, NSDC-519-000876, 국방과학연구소 기술보고서.

부 록

1. 어뢰의 TDC(Target Data Calculation) 모델

잠수함 및 수상함에서 어뢰의 발사 조건을 계산하기 위한 기하학적 구성은 다음 그림 1-1과 같다.

여기서, δ_M 은 어뢰 편향각, R_{enab} 는 활성화 거리, V_M 은 어뢰 속도, R_{det} 는 어뢰의 최대 탐지거리, α_T 는 어뢰에서 본 표적함의 방위각, V_T 는 표적함의 속도이다. 어뢰가 활성화 거리를 가는데 걸리는 시간을 t_0 , 최대 탐지거리를 가는데 걸리는 시간을 t_1 이라 하면 다음 식이 성립한다.

$$V_T \cdot \sin(\alpha_T) \cdot t_0 = V_M \cdot \sin(\delta_M) \cdot (t_0 + t_1)$$

$$\therefore \delta_M = \sin^{-1} \left[\frac{V_T}{V_M} \cdot \sin(\alpha_T) \frac{t_0}{t_0 + t_1} \right] \quad (1-1)$$

여기서, $t_1 = R_{det}/V_m$ 의 식으로 구할 수 있으나, t_0 를 구하기 위해서는 다음과 같은 관계식을 도입하여야 한다.

$$\frac{R_{dist} - V_T \cdot \cos(\alpha_T) \cdot t_0}{V_M \cdot \cos(\delta_M) \cdot (t_0 + t_1)} \quad (1-2)$$

식 (a-1)과 (a-2)를 연립하면 다음과 같은 2차 방정식을 얻을 수 있다.

$$(V_M^2 - V_T^2) \cdot t_0^2 + R_{det}^2 - R_{dist}^2 + 2 \cdot [R_{dist} \cdot V_T \cdot \cos(\alpha_T) + V_M^2 \cdot t_1] \cdot t_0 = 0 \quad (1-3)$$

식 (a-3)에서 구한 t_0 를 식 (a-1)에 대입하면 편향각 δ_M 이 구해진다. δ_M 을 사용하면 어뢰 발사각 ψ_M 을 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$\psi_M = \psi_T + \alpha_T + \pi + \delta_M \quad (1-4)$$

또한, 다음 관계식을 사용하여 활성화 거리 R_{enab} 도 구할 수 있다.

$$F_{dist} - R_{det} \cdot \cos(\delta_M) = [V_M \cdot \cos(\delta_M) + V_T \cdot \cos(\alpha_T)] \cdot t_1$$

$$\therefore R_{enab} = \frac{V_M \cdot [R_{dist} - R_{det} \cdot \cos(\delta_M)]}{V_M \cdot \cos(\delta_M) + V_T \cos(\alpha_T)} \quad (1-5)$$

단, 여기서 R_{dist} , α_T 및 V_T 는 TMA에서 나온 측정치들이다.

2. 어뢰의 질점 운동 모델

어뢰의 질점 운동 모델의 운동방정식은 다음과 같다.

$$V_M = \text{const.}$$

$$\theta_M(t + \delta t) = \theta_M(t) + q_M \cdot \delta t$$

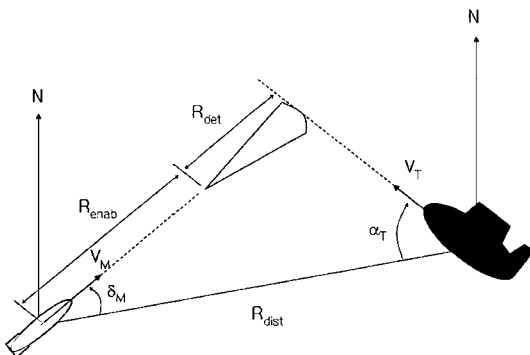


그림 1-1. TDC를 위한 기하학적 구성

$$\psi_M(t + \delta t) = \psi_M(t) + r_M \cdot \delta t$$

$$X_M(t + \delta t) = X_M(t) + V \cos(\theta_M(t)) \cos(\psi_M(t)) \cdot \delta t$$

$$Y_M(t + \delta t) = Y_M(t) + V \sin(\psi_M(t)) \cdot \delta t$$

$$Z_M(t + \delta t) = Z_M(t) - V \sin(\theta_M(t)) \cdot \delta t \quad (2-1)$$

여기서, V_M , θ_M , ψ_M , q_M , r_M 은 각각 어뢰 고정좌표계에서의 속도, 종동요각, 선수동요각, 종동요 각속도, 선수동요 각속도이며, X_M , Y_M , Z_M 은 공간 고정좌표계에서의 어뢰 위치이며, t 는 주어진 시간이고 δt 는 계산 시간 간격이다. 또한, r_M 은 선회 반경에 따라 정해지는 입력이고 q_M 은 이동하고자 하는 심도 변화나 명령 종동요각에 의해 결정되는 값이다. 본 모델에서는 미결정된 q_M 을 위해 다음과 같은 제어명령을 사용하였다.

$$\theta_c = -45 \cdot \text{sign}(Z_c - Z_M) \quad \text{if } |Z_c - Z_M| \geq 45$$

$$= -45 \cdot (Z_c - Z_M) \cdot \text{sign}(Z_c - Z_M)$$

$$\text{if } |Z_c - Z_M| < 45$$

$$q = 30 \cdot (\theta_c - \theta_M) / 45 \quad (2-2)$$

식 (2-2)에서 최대 종동요각을 45°로 제한한 것은 대부분의 어뢰가 그 이상의 종동요각을 사용하지 않기 때문이며, 두 번째 식은 오버슈트와 상승시간 등을 고려하여 적절히 이득치를 조절한 것이다. 식 (2-1)과 식 (2-2)를 사용하여 0m의 심도에서 40m로 이동한 후 4°/sec로 1회 원형 탐색하고 40m와 100m 사이를 8°/sec로 나선형 탐색하는 경우에 대한 궤적 결과를 그림 2-1에서 그림 2-7까지 도시하였다. 이 때 나선형 탐색시의 상승 운동을 위한 종동요각은 3°로 하였다.

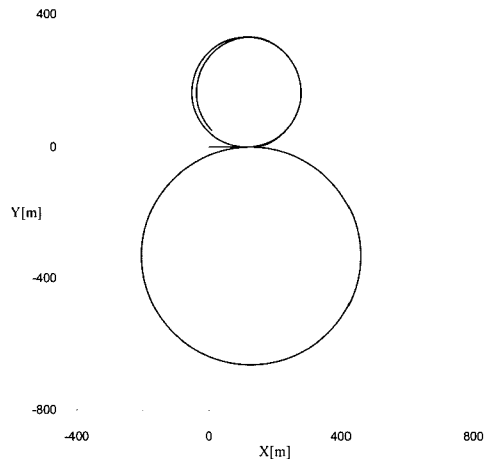


그림 2-1. 어뢰의 수평면 궤적

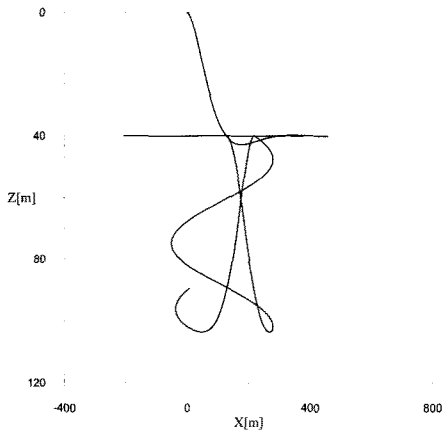


그림 2-2. 어뢰의 수직면 궤적

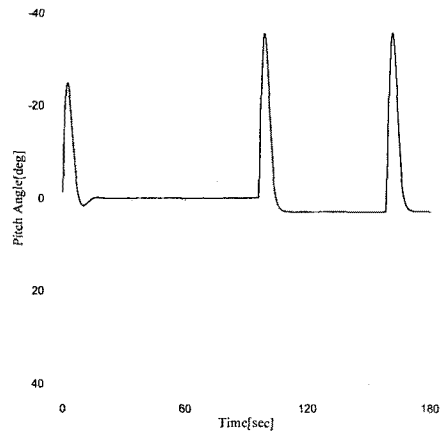


그림 2-5. 어뢰의 종동요각

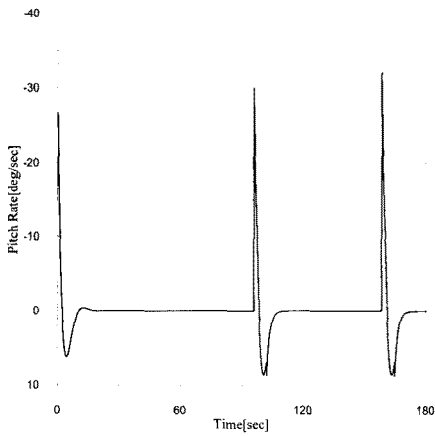


그림 2-3. 어뢰의 종동요 각속도

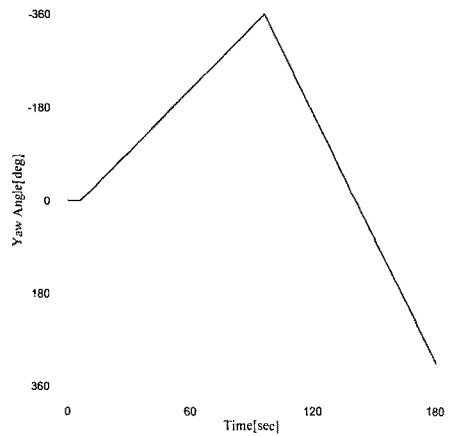


그림 2-6. 어뢰의 선수동요각

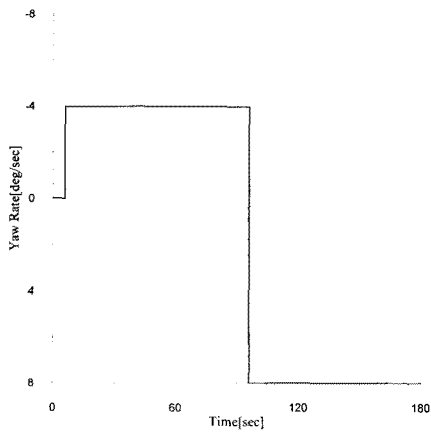


그림 2-4. 어뢰의 선수동요 각속도

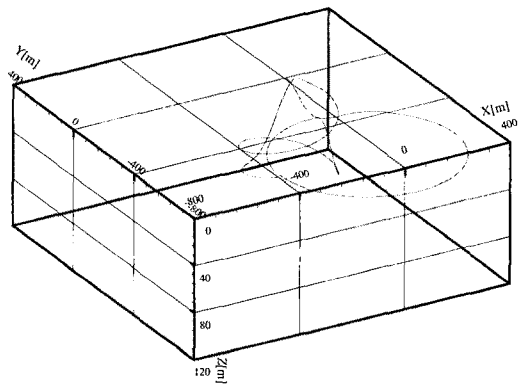


그림 2-7. 어뢰의 3차원 운동 궤적



신 지 환 (naraboja@add.re.kr)

1997년 부산대학교 항공우주공학과 학사

1999년 부산대학교 항공우주공학과 석사

1999년~2002년 한국전기연구원 메카트로닉스연구그룹 위촉연구원

2002년~2006년 한국항공우주산업(주) T-50비행제어팀 선임연구원

2006년~현재 국방과학연구소 제2체계개발본부 연구원

관심분야 : 수중운동체, 모델링&시뮬레이션(M&S), 조종안정성