

# 공학급 국방 모델의 시뮬레이션 성능 향상을 위한 다중 충실도 M&S 기법 연구

최선한<sup>1</sup> · 서경민<sup>1†</sup> · 권세중<sup>1</sup> · 김탁곤<sup>1</sup>

## Multi-fidelity Modeling and Simulation Methodology to Enhance Simulation Performance of Engineering-level Defense Model

Seon Han Choi · Kyung-Min Seo · Se Jung Kwon · Tag Gon Kim

### ABSTRACT

This paper presents multi-fidelity modeling and simulation (M&S) methodology to enhance simulation performance of engineering-level defense models. In this approach, a set of models with varying degrees of fidelity is exercised to reduce computational expense maintaining a similar level of system effectiveness. For multi-fidelity M&S principles, this paper defines model fidelity from two perspectives (i.e., model behavior and execution), and suggests the Fidelity Change Point (FCP) to specify the fidelity conversion. With these concepts, this paper centers on three ideas: 1) two models' structure which are the Behavioral-Fidelity Interchangeable Model (B-FIM) and the Executional-Fidelity Interchangeable Model (E-FIM), 2) modeling formalism, and 3) a simulation algorithm to support them. From an abstract case study regarding a target tracking scenario with the utilization of the proposed method, we can gain interesting experimental results regarding the enhancement of simulation performance. Finally, we expect that this work will serve various M&S-based analysis areas for enhancing simulation performance.

**Key words** : Modeling and simulation, Engineering-level defense model, Multi-fidelity, Simulation enhancement

### 요약

본 논문은 공학급 국방 모델의 시뮬레이션 성능 향상을 위해 다중 충실도(Multi-fidelity) 모델링 시뮬레이션(M&S: Modeling and Simulation) 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 다양한 충실도를 지닌 모델을 활용하여 고 충실도 모델의 시뮬레이션과 비교하여 유사한 수준의 시스템 분석 결과를 얻음과 동시에 시뮬레이션 성능 측면에서 이득을 가져오는 방안이다. 다중 충실도 원리를 적용하기 위해 본 논문은 충실도를 모델 동작과 실행 측면으로 세분화하고, 충실도 변환 지점을 FCP (Fidelity Change Point)로 정의한다. 이러한 원리를 바탕으로 본 논문은 다음의 세 가지 쟁점을 다룬다. 먼저, 모델 동작과 실행 측면의 충실도 변환을 위한 모델 구조와 제안하는 모델에 대한 수학적 형식론, 마지막으로 모델 실행을 위한 시뮬레이션 알고리즘을 제안한다. 사례 연구로 어뢰의 표적 추적 시나리오에 대한 기초 실험을 수행하였고, 실험 결과 제안하는 기법을 사용한 경우 기존의 시뮬레이션과 비교하여 최대 4.24배의 시뮬레이션 성능 향상을 보임을 확인하였다. 본 논문에서 제안하는 기법은 M&S 기반의 시스템 분석을 하는 다양한 분야에서 활용될 수 있음을 기대한다.

**주요어** : 모델링 시뮬레이션, 공학급 국방 모델, 다중 충실도, 시뮬레이션 성능 개선

## 1. 서론

\*본 연구는 국방과학연구소 핵심연구사업의 지원으로 수행되었습니다. (계약번호 UD110037DD)

접수일(2013년 11월 1일), 심사일(2013년 11월 7일), 게재 확정일(2013년 11월 12일)

<sup>1)</sup> 한국과학기술원 전기및전자공학과

주 저 자 : 최선한

교신저자 : 서경민

E-mail; kmseo.kumsung@gmail.com

모델링 시뮬레이션(M&S: Modeling and Simulation)은 실세계 시스템(Real-world system)의 문제를 수치적(Numerically) 혹은 분석적(Analytically)으로 해결할 수 없는 경우에 폭넓게 활용된다(Kim, 2007). M&S를 통한 문제 해결은 시스템의 설계(Design)/분석(Analysis)/획득(Acquisition)/훈련(Training) 등에서 기존의 방법으로는

불가능하였던 새로운 통찰력(Insight)을 제공한다. 국방 분야를 예로 들면, 전투 실험(Battle experiment)을 통한 미래 작전 요구사항(Future operation capability)의 분석(Kim et al., 2012)이나 차기 무기 체계의 성능획득 및 전술분석(Seo et al., 2011)이 M&S를 통해 달성된다.

이러한 다양한 활용에도 불구하고 대부분의 M&S를 통한 문제 해결 과정은 가능한 모든 실험 요인(Experimental factor)들에 대한 시뮬레이션 결과를 분석하는 이른바 “what-if” 실험을 수행해야 한다. 특히, M&S 기반 시스템 분석의 경우, 분석하고자 하는 실험 요인들의 조합은 대다수 복잡하여 시뮬레이션을 수행하는 데 많은 시간이 소요된다. 이를 해결하기 위해(시뮬레이션 성능 향상을 위해) 다양한 관점에서 많은 연구가 진행되어 왔는데, 예를 들어 Kwon et al.(2011)은 모델 실험의 성능 개선을 위해 이벤트 지향 시뮬레이션 엔진을 개발하였고, Hong et al.(2013)은 하이브리드 시스템의 시뮬레이션 기반 최적화 기법을 연구하였다.

본 논문은 M&S 기반 시스템 분석 시에 시뮬레이션 성능 향상을 위한 새로운 접근 방법으로 다중 충실도(Multi-fidelity) 개념을 도입한다. 여기서 충실도(Fidelity)란 모델이 대상 시스템을 얼마나 정확히(Accurate) 표현하였는지를 나타내는 정도이다(Kim, 2013). 예를 들어, 고 충실도(High-fidelity) 모델은 대상 시스템을 보다 정확히 표현하고자 많은 계산량(Computation load)을 필요로 하는 반면에, 저 충실도(Low-fidelity) 모델은 상대적으로 적은 계산량으로 간단히 표현된다. 따라서 다중 충실도 M&S란 어떠한 기준에 따라 모델의 충실도를 변경하면서 시뮬레이션을 진행함을 의미한다. 시뮬레이션 성능 향상에 이러한 다중 충실도 기법을 적용하는 실용적 근거는 시스템을 분석하는 데 있어 시뮬레이션 초기부터 종료 시점까지 모든 단계에서 정확히 표현된 모델을 사용할 필요가 없기 때문이다. 예를 들어, 임의의 교전 시나리오에 대하여 교전 효과도(분석 지수)를 분석하는 시뮬레이션의 경우, 분석 지수에 직접적으로 연관이 있는 단계만 정확히 표현하는 것이 시뮬레이션 성능 측면에서 보다 효율적이다.

따라서 본 논문은 시뮬레이션 성능 향상을 위해 다중 충실도 M&S 기법을 제안한다. 본 논문의 대상 시스템은 공학급(Engineering-level) 국방 모델로써, 선정 근거는 첫째, 공학 모델의 내부에 구성되는 탐지/기동/제어 하위 모델들이 다중 충실도를 적용하기에 적합하고 둘째, 공학급 국방 모델을 포함하는 전체 교전 시스템의 M&S 목적이 교전 효과도 분석과 같은 시스템 분석이기 때문이다. 제안하는 기법을 효과적으로 설명하기 위해서는 몇 가지

용어(Terminology)의 정의가 필요하다. 본 논문에서는 모델의 충실도를 모델의 동작(Behavior)과 실행(Execution) 측면으로 세분화하여 정의하고, 모델의 충실도가 변경되는 임계점을 Fidelity Change Point (FCP)로 정의한다.

정의된 용어들을 바탕으로 본 논문은 다중 충실도 M&S 기법을 모델 구조, 모델 형식론, 그리고 시뮬레이션 알고리즘 순으로 단계적으로 제안한다. 먼저, 모델 동작과 실행 측면에서 다중 충실도를 적용하기 위해 모델 구조적 측면에서 Behavioral-Fidelity Interchangeable Model (B-FIM)과 Executional-Fidelity Interchangeable Model (E-FIM)을 제안한다. 다음으로 이들의 수학적 형식론을 정의하고 형식론 내부의 FCP는 시뮬레이션 상황에 따라 적응하여(Adaptively) 모델의 충실도가 변경되는 의미론(Semantics)을 제공한다. 제안하는 B-FIM과 E-FIM은 기존의 전체 모델에서 다중 충실도를 적용하고자 하는 하위 모델을 대신하여 플러그인(Plug-in)됨으로써 기존 모델을 전혀 수정하지 않고 사용할 수 있는 장점이 있다. 마지막으로 B-FIM과 E-FIM이 포함된 모델의 실행을 위해 수정된 시뮬레이션 알고리즘을 제안한다. 사례 연구는 어뢰의 표적 추적 시나리오에 대한 시뮬레이션 분석 실험으로 제안하는 기법을 적용하면 기존의 시뮬레이션보다 동일한 분석 지수를 얻으면서 시뮬레이션 성능 측면에서 최대 4.24배의 이득을 얻음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저, 2장에서 배경 지식으로 본 논문의 핵심 용어인 충실도와 M&S에 다중 충실도를 적용한 사례 연구를 살펴본다. 3장에서는 M&S 기반 시스템 분석에 다중 충실도 기법을 적용하는 실용적 근거와 이론적 접근 방법을 알아본다. 4장은 본 논문에서 제안하고자 하는 다중 충실도 M&S 기법에 대하여 자세히 설명한다. 5장은 사례 연구로 어뢰의 표적 추적 시나리오에 대하여 제안하는 기법을 적용한 실험 결과를 토의하고, 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

## 2. 배경 지식

본 장은 시뮬레이션 모델의 추상화(Abstraction) 수준을 나타내는 두 개념인 충실도와 해상도에 대하여 알아보고, 다중 충실도를 고려한 M&S 연구 사례를 살펴본다.

### 2.1 충실도(Fidelity)와 해상도(Resolution)

M&S은 실제 시스템을 목적(Objective)에 맞게 추상화하는 과정이고, 추상화는 세부적으로 충실도와 해상도(Resolution)로 구분된다. 충실도는 실제 시스템과 비교

하여 정확도와 관계있고 해상도는 자세한 정도(level of detail)와 관련이 있다(Kim, 2013). Fig. 1은 이러한 충실도와 해상도 개념을 등가속도 운동 시스템을 예로 들어 나타낸다.

실세계의 등가속도 운동 시스템에 대한 모델 표현을  $M_i$ 라 가정하면 충실도와 해상도는  $M_i$ 의 내부 요소들 ( $v_0, a, n$ )을 어떻게 표현하느냐에 따라 구분된다. 예를 들어,  $M_i$ 의 계수들이 동일할 때 시간  $t$ 의 제곱수인  $n$ 의 값이 실세계 시스템에 근접할수록 시스템을 정확히 표현할 수 있으므로 충실도 수준이 높아진다(예:  $M_A$ 는  $M_C$ 보다 높은 충실도를 지닌다). 이와는 달리, 해상도는 모델 내부 계수들의 자세한 정도와 관련이 있는데, 예를 들어  $v, v_0, a$ 에 대하여 더 넓은 범위의 수 체계로 표현 가능할수록(예: 정수→소수점 자릿수가 5인 실수) 해상도가 높은 모델이 된다(예:  $M_A$ 는  $M_C$ 보다 높은 해상도를 지닌다). Fig. 1의 이러한 충실도 예를 시스템 출력 관점에서 해석하면 모델의 출력이 실세계 시스템의 출력을 정확하게 반영할수록 모델의 충실도가 높다고 할 수 있다. Fig. 2(Fig. 1

의  $M_i$ 에서  $v_0 = 0, a = 5$ 인 경우)는 모델의 충실도를 시스템 출력 관점에서 바라본 예를 나타낸다.

Fig. 2를 살펴보면, Fig. 1에서 설명한 바와 같이 모델의 동작(Behavior)을 정확하게 표현하는 방법도 있지만 (Fig. 2(a)의 경우) 동일한 동작을 나타내는 모델이라 할 지라도 실행(Execution) 빈도에 따라 다른 충실도를 나타 내기도 한다(Fig. 2(b)의 경우). 예를 들어, Fig. 2(b)는 모델의 동작은 Fig. 1의  $M_B$ 의 경우로 높은 충실도를 가지 지만 얼마나 자주 모델을 실행하여 출력 값을 산출하느냐에 따라 충실도가 달라지는 경우를 나타낸다. 따라서 본 논문은 M&S 기반의 시스템 분석에 필요한 모델의 충실도를 모델 동작과 실행 측면으로 나누어 접근하고자 하며 Fig. 2는 그 이론적 근거를 제공한다.

2.2 관련 연구: 다양한 충실도를 고려한 M&S 사례

Table 1을 통해 다양한 충실도를 고려한 M&S 연구 사례를 정리하였다. 먼저, 국내 사례를 살펴보면 다양한 충실도 모델 개발의 필요성을 언급하긴 하였지만 이들을 함께 고려한 다중 충실도 기반의 M&S는 연구된 바가 없다. 예를 들어, Ryoo et al.(2013)은 고 충실도 시뮬레이터와 저 충실도 시뮬레이터/표준화 환자의 다중 모드 비교 실험을 통해 심정지 환자응급간호의 학습효과에는 차이가 없음을 증명하였고, Kim et al.(2008)은 헬리콥터 기동비행 모델링에 대하여 다양한 충실도 모델을 개발함으로써 상황에 맞는 충실도 모델을 적용할 수 있는 M&S 개발 환경을 개발하였다. 이들 연구는 다중 충실도 기법을 제안했다기보다는 시뮬레이션 상황에 따라 저 충실도 M&S의 필요성을 언급한 연구들이라 할 수 있다. 해외 사례의 경우에는 보다 실용적으로 다중 충실도 M&S를 적용해 왔다. 주로 고 충실도 M&S가 반드시 필요한 항공우주공학에서 많은 연구가 이루어졌는데, Vitali et al.(2002)은 비행기의 Crack propagation에 다중 충실도 모델을 적용하였고, Gano et al.(2005)은 동적 시스템에 적용하였다. 많은 해외 사례에서 연구된 다중 충실도 M&S 기법은

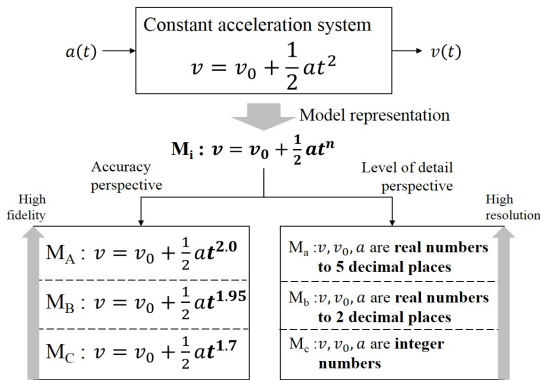


Fig. 1. Fidelity and resolution for an abstracted model (Kim, 2013)

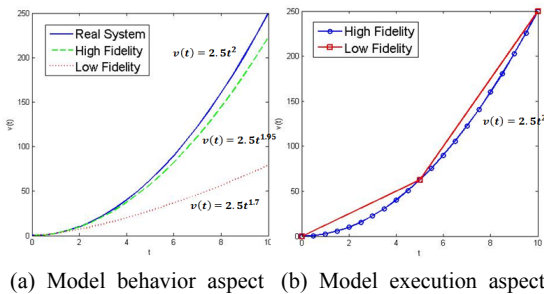


Fig. 2. Outputs comparison between the real system and variable fidelity models

Table 1. Previous works: M&S development using variable fidelity concept

Previous Works	Domain	M&S Objective
(Ryoo et al., 2013)	Nursing	M&S-based earning
(Kim et al., 2008)	Aerospace	M&S-based training
(Vitali et al., 2002)	Aerospace	M&S-based design
(Gano et al., 2005)	Aerospace	M&S-based design

M&S의 목적 자체가 시스템 분석보다 시스템 설계/검증에 초점을 맞추고 있다. 실제로, M&S 기반 시스템 분석에서 다중 충실도 개념을 도입한 연구 사례는 거의 없었기 때문에 본 연구는 M&S 기반의 시스템 분석에 다중 충실도를 적용하는 기초 연구로 큰 의미가 있다.

### 3. 문제 정의

본 장에서는 M&S 기반의 시스템 분석에 다중 충실도를 적용하고자 하는 실용적인 근거와 이에 대한 이론적 접근 방법을 설명한다.

#### 3.1 실용적 근거(Practical grounds)

M&S 기반의 시스템 분석은 실제 시스템 기반의 분석과 달리 실험 인자(Experimental factor)의 개수와 수준(Level of factor)이 굉장히 많은 경우가 대부분이다. 그리고 시스템을 추상화한 모델은 대부분 확률 기반 모델이기 때문에 반복 시뮬레이션을 통한 시스템 분석을 수행해야 한다(Seo et al., 2013). 본 절에서는 이러한 상황을 가상의 예를 통해 실용적 이유를 설명한다. M&S 기반 시스템 분석의 예로 해양 교전 시나리오의 교전 효과도를 측정하는 M&S를 가정한다. Table 2는 해당 시나리오에서 전투 개체(Combat entity)들에 대한 실험 설계(Experimental design)이고, Fig. 3은 교전 시나리오를 간단하게 도식화한 것이다. Table 2에서 실험 인자는 총 8개이고  $F_1$ 을 제

**Table 2.** An example for M&S-based analysis: experimental design and execution time

Combat Entity (Model Object)	Experimental Design	
	Experimental factor	Level of Factor
Submarine	F1	2
	F2	4
Warship	F3	4
	F4	4
Torpedo	F5	4
	F6	4
Decoy	F7	4
	F8	4
Total Design Cases	$2 \times 4^7 \times 50 = 32,768 \times 50 = 1,638,400$	
Total Simulation Execution Time	$1,638,400 \times 20(sec) = 32,768,000(sec) = 379.26(days)$	

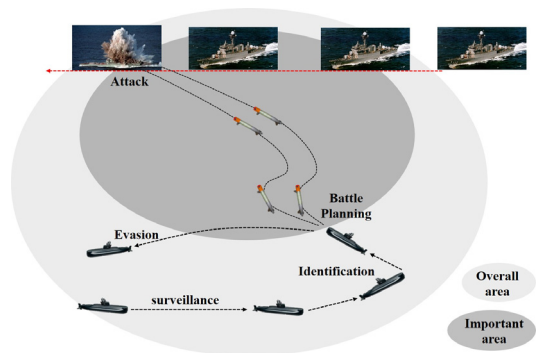
외한 모든 인자들이 4개의 수준을 가진다. 시뮬레이션 모델(전투 개체)은 내부적으로 확률 변수를 포함하기 때문에 개별 시나리오 당 50번의 반복 실험을 수행한다고 가정한다. 이 경우, 총 실험 횟수(Total design cases)는 1,638,400회이고 단일 시뮬레이션의 실행 시간을 20초라고 가정한다면 전체 시뮬레이션을 하는데 걸리는 시간(Total simulation execution time)은 약 379일이 필요하다(Table 2 참조). 이처럼 M&S 기반 시스템 분석의 경우 실험 시나리오의 수가 많아질수록 시뮬레이션 성능 향상은 필연적으로 고려해야 할 쟁점이 된다.

실험 설계 측면에서 바라본 첫 번째 이유는 실제로 다중 충실도 기반의 M&S 기법에 국한된 사안은 아니다. M&S 기반 시스템 분석에 다중 충실도를 적용한다는 것은 전체 시뮬레이션 과정이 고 충실도의 M&S와 저 충실도의 M&S가 공존하여 수행됨이 전제되어야 한다. 이를 Fig. 3을 통해 설명하면 다음과 같다.

Fig. 3의 잠수함은 정찰(surveillance)과 식별(Identification) 단계를 거쳐 교전 계획(Battle planning)을 세우고 공격(Attack)을 수행한 다음 회피(Evasion)를 하는 교전 단계를 거친다. M&S 기반의 시스템 분석을 통해 측정하고자 하는 분석 지수가 공격 어뢰의 명중률이라면 사실상 잠수함의 정찰/회피 단계에 대하여 고 충실도로 M&S를 수행할 필요가 없다. 다시 말하면, 전체 시뮬레이션 영역에서 중요 영역에 대해서만 고 충실도 M&S를 수행한다 하더라도 측정하고자 하는 분석 지수에는 영향을 미치지 않는다. 이 점이 M&S 기반 시스템 분석에 다중 충실도 기법을 사용하는 직접적인 이유이다.

#### 3.2 이론적 접근(Theoretical approach) 방법

본 연구의 목적은 M&S 기반의 시스템 분석에 시뮬레



**Fig. 3.** Simulation scenario example: overall simulation area and an important area

이선 성능 이득을 위하여 다중 충실도 M&S 기법을 적용하는 것이다. 이를 위한 이론적 접근 방법은 Fig. 4와 같이 3가지로 요약 가능하다.

Fig. 4에서와 같이 다중 충실도 M&S를 위해서는 먼저 다중 충실도를 적용하고자 하는 모델이 무엇인지(What), 그리고 해당 모델의 충실도를 어떻게(How) 변경할 것인지(How), 마지막으로 언제(When) 모델의 충실도를 변경할지를 고려해야 한다. 서론에서 언급하였듯이, 본 논문의 대상 시스템(What)은 공학급 국방 모델이다. 공학급 국방 모델은 항공 역학, 유체 역학, 음향 신호처리 등과 같은 기초 공학 모델을 포함하며, 무기체계 개발 시 체계의 성능/재원 분석, 설계검증/개발 등에 사용되는 최하위 수준

의 국방 모델이다(Kim, 2013). 공학급 국방 모델은 학술적으로는 동적 시스템 모델로 분류 가능하고, 모델 표현을 위해 미분 방정식 등으로 모델링할 수 있다(Hong et al., 2010). Lim et al.(2001)은 동적 시스템의 수학적 형식론을 다음과 같이 정의하였다.

$$M = \langle X, S, Y, f, g \rangle$$

- $X$  : 입력 집합
- $S$  : 상태 집합
- $Y$  : 출력 집합
- $f$  : 상태 천의 함수  $\frac{d}{dt}S(t) = f(S(t), X(t), t)$
- $g$  : 출력 함수  $Y(t) = g(S(t), X(t), t)$

본론에서는 Lim et al.(2001)이 제안한 동적 시스템의 형식론을 기본으로 하여 다중 충실도를 위한 M&S 기법 (Fig. 4의 How, When)을 설명한다.

#### 4. 본 론

제안하는 다중 충실도 M&S 기법의 설명 순서는 다음과 같다. 먼저 제안 기법을 개관적으로 설명하고, 세부적으로 모델 구조 및 형식론, 모델 실행을 위한 시뮬레이션

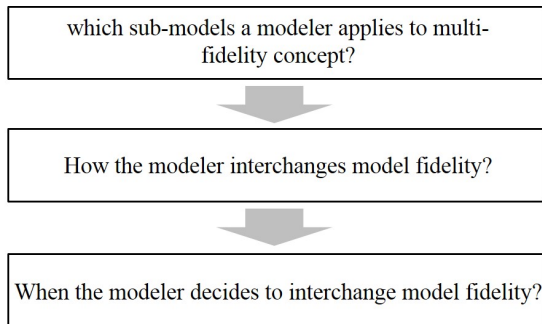


Fig. 4. Theoretic considerations for multi-fidelity M&S

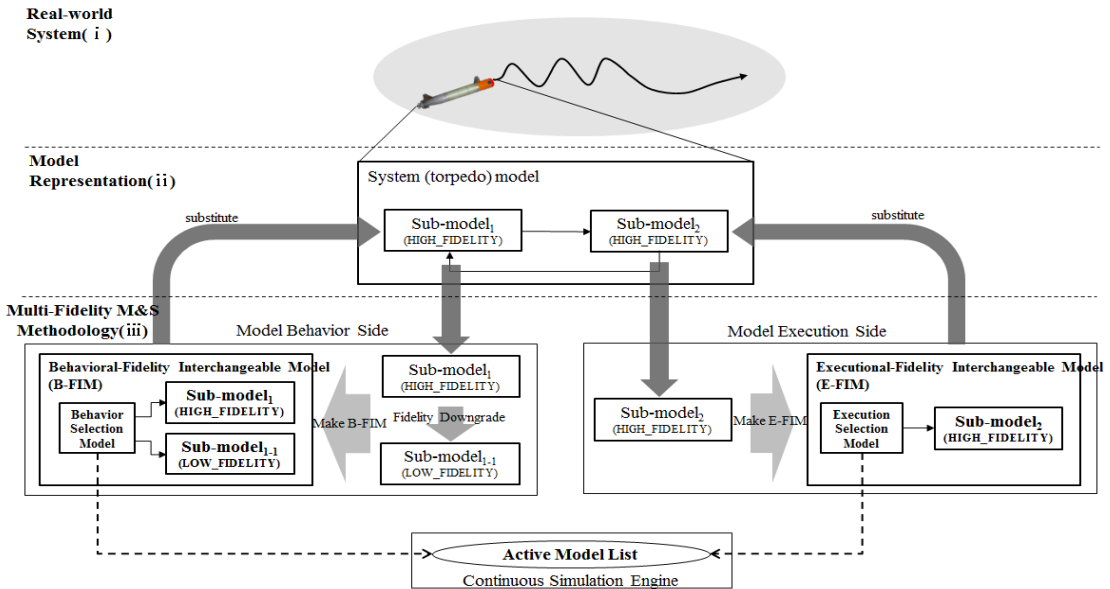


Fig. 5. Overview diagram of the proposed methodology for multi-fidelity M&S

알고리즘을 제안하며 마지막으로 제안 기법의 이해를 돕기 위해 공학 모델을 예시로 설명한다.

#### 4.1 다중 충실도 M&S 기법 개요

본 논문에서 제안하는 다중 충실도 M&S 기법은 Fig. 5와 같이 실제 시스템 (i)에 대하여 기본적으로 고 충실도 모델로 표현이 가능할 때(ii), 이를 대체할 다중 충실도 모델을 설계/개발하여 시뮬레이션을 수행하는 방안(iii)이다. 다중 충실도 M&S 적용은 관점에 따라 모델의 동작 측면과 실행 측면으로 나뉜다. 동작 측면의 다중 충실도는 고 충실도 모델을 포함한 다양한 충실도를 가진 모델들을 기반으로 시뮬레이션 도중에 모델의 충실도를 변경하게 되는데 이를 위해 Behavioral-Fidelity Interchangeable Model (B-FIM)을 제안한다. 그리고 실행 측면의 다중 충실도는 단일 고 충실도 모델에 대하여 실행하는 시간 간격을 유동적으로 조절하기 위해 Executional-Fidelity Interchangeable Model (E-FIM)을 제안한다. 마지막으로 B-FIM과 E-FIM의 내부적으로 포함된 다양한 수준의 충실도 모델들 중에서 필요한 모델만 선택/실행하기 위한 ActiveModelList를 추가적으로 제안한다.

모델 설계 시 필수적으로 고려할 사항은 제안하는 모델이 기존 모델의 수정 없이 플러그인이 가능해야 한다는 점이다. 이를 위해 B-FIM과 E-FIM은 기본적으로 기존의 고 충실도 모델과 동일한 입출력 값을 가진다. 이어지는 절에서 언급한 모델들(B-FIM과 E-FIM)에 대하여 자세히 설명한다.

#### 4.2 제안하는 B-FIM의 구조 및 형식론

Fig. 6은 본 논문에서 제안하는 B-FIM의 개략적인 모델 구조를 나타낸다. B-FIM은 입출력 집합, 다양한 충실도를 가진 모델 집합(예를 들어 Fig 6의  $M_i$ 이 기존의 고 충실도 모델이면  $M_2, M_N$  등은 충실도 변환 과정을 통하여  $M_1$ 으로부터 개발된 저 충실도 모델들이다), 모델의 충실도를 결정하고 해당 모델에 맞게 변환된 입력을 전달하

는 Behavior Selection Model (BSM), 그리고 이들의 출력 변환을 위한 변환 함수( $g_{out}$ )로 구성된다. B-FIM에 대한 수학적 형식론은 다음과 같다.

$$B-FIM = \langle X, Y, \{M_i\}, BSM, g_{out}, MCS \rangle$$

- $X, Y$  : 입력 및 출력 집합
- $\{M_i\}$  : 다양한 충실도를 가진 모델 집합
- $BSM$  : 동작 충실도 선택 모델  
(Behavior Selection Model)
- $g_{out}$  : 출력 변환 함수  $2^Y - \Phi \rightarrow Y$
- $MCS$  : 모델 연결 관계 (Model Coupling Scheme)

$$MCS \subseteq EIC \cup EOC \cup IC$$

$$EIC = X \times BSM.X : \text{외부 입력 연결 관계}$$

$$EOC = \cup_i M_i.Y \times Y : \text{외부 출력 연결 관계}$$

$$IC \subseteq BSM.Y \times \cup_i M_i.X : \text{내부 연결 관계}$$

B-FIM은 전체 모델의 수정 없이 기존의 고 충실도 모델을 대체할 수 있어야하기 때문에 B-FIM의 입출력 집합이( $X, Y$ )은 기존의 고 충실도 모델의 입출력 집합과 동일해야 한다. 그러나 다양한 충실도의 모델들( $M_1, M_N$  등)은 실제 동작을 어떻게 표현하였는가에 따라 고 충실도 모델의 입출력 집합과 다를 수 있다. 따라서 B-FIM의 주된 기능 중 하나는 적절한 입출력 변환이다. 예를 들어, B-FIM은 입력 집합인  $X$ 를  $\{M_i\}$ 의 입력으로 알맞게 변환하고  $\{M_i\}$ 의 출력을 B-FIM의  $Y$ 로 적절히 변환한다. 전자의 경우는  $BSM$ 을 통해 달성되고, 후자는 출력 변환 함수( $g_{out}$ )로 해결된다. 마지막으로  $MCS$ 는 B-FIM 내/외부로 연결되는 모든 연결 명세를 정의한다.

$BSM$ 은 앞서 설명한 입력 변환 기능 이외에 시뮬레이션 도중에 정해진 기준에 따라 충실도 모델을 변경해주는 역할도 담당한다.  $BSM$ 의 구조는 Fig. 7과 같고 이에 대

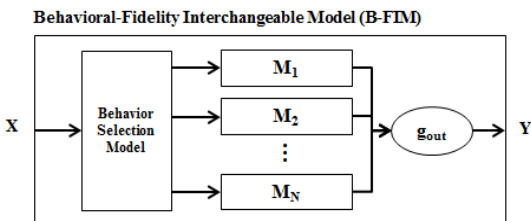


Fig. 6. Model structure of proposed B-FIM

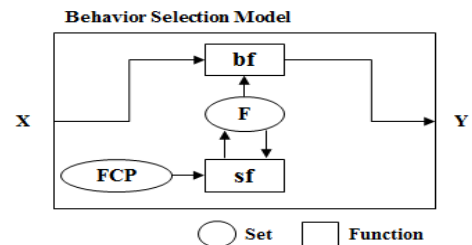


Fig. 7. BSM structure as component of B-FIM



한 수학적 형식론은 다음과 같다.

$$BSM = \langle X, Y, F, FCP, sf, bf \rangle$$

- $X, Y$  : 입력 및 출력 집합
- $F = \{(M_i, fr) | M_i \in \{M_i\}, fr \in FidelityRank\}$   
: 모델 충실도 집합
- $FCP = \{(S, v) | S \in FidelityStateVariable, v \in ChangePoint\}$   
: 충실도 변환 지점 집합
- $sf$  : 충실도 결정 함수  $F \times FCP \rightarrow F$
- $bf$  : 입력 전달 함수  $X \times F \rightarrow Y$

모델 충실도 집합,  $F$ 는  $M_i$ (다양한 충실도를 가진 모델)와  $fr$ (해당 모델의 충실도 등급(Rank))이 일대일 대응 관계를 이룬다. 즉, 기존의 고 충실도 모델은  $fr$ 이 0이며 대체할 다양한 저 충실도의 모델들은  $fr$ 로 구별 가능하다.  $FCP$ 는 충실도 변환 지점 집합으로  $F$ 와 마찬가지로 두 원소의 쌍으로 정의된다(충실도 상태 변수인  $S$ 와 해당 변수의 충실도 변경 지점인  $v$ ). 예를 들어, 어뢰 교전 시뮬레이션(Seo et al., 2011)에서  $FCP$ 는 {(어뢰와 표적 사이 거리, 3000)}로 표현할 수 있고 적용 대상에 따라 모델의 질적인 상태, 혹은 양적인 변수가 될 수도 있다.

이러한  $FCP$ 는  $BSM$ 의 핵심 역할인 현재의 충실도를 결정하는 데 사용된다. 이러한 충실도 결정은  $sf$ 를 통해 정의하였는데  $sf$ 는 현재의 충실도( $F$ )에서 충실도 변환 조건( $FCP$ )에 따라 다음 충실도( $F$ )를 결정한다( $X \times FCP \rightarrow X$ ). 마지막으로 입력 전달 함수인  $bf$ 는 앞서 설명하였듯이 외부로부터 전달받은 입력을 현재의 충실도에 대응되는 모델에 적절하게 변환하여 전달한다( $X \times F \rightarrow Y$ ).

### 4.3 제안하는 E-FIM의 구조 및 형식론

본 논문에서 제안하는 E-FIM의 개략적인 모델 구조는 Fig. 8과 같다. E-FIM은 입출력 집합, 실행 시간 간격을 조정할 대상 모델( $M$ ), 그리고 내부의 충실도 변경에 따라서 모델의 실행 시간 간격을 조정하는 Execution Selection Model ( $ESM$ )으로 구성된다. E-FIM에 대한 수학적 형식론은 다음과 같다.

$$E-FIM = \langle X, Y, M, ESM, MCS \rangle$$

- $X, Y$  : 입력 및 출력 집합
- $M$  : 실행 시간 간격을 조정할 대상 모델

Execuational-Fidelity Interchangeable Model (E-FIM)

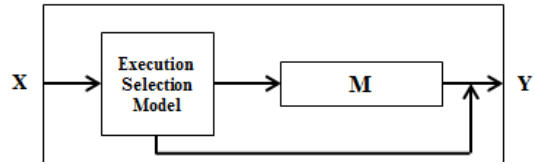


Fig. 8. Model structure of proposed E-FIM

Execution Selection Model

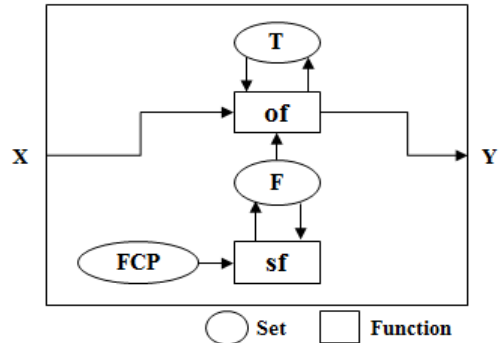


Fig. 9. ESM structure as component of E-FIM

- $ESM$  : 실행 충실도 선택 모델 (Execution Selection Model)
- $MCS$  : 모델 연결 관계 (Model Coupling Scheme)  
 $MCS \subseteq EIC \cup EOC \cup IC$   
 $EIC = X \times ESM.X$  : 외부 입력 연결 관계  
 $EOC = M.Y \times Y \cup ESM.Y \times Y$  : 외부 출력 연결 관계  
 $IC = ESM.Y \times M.X$  : 내부 연결 관계

E-FIM은 B-FIM과 마찬가지로 기존의 고 충실도 모델을 모델의 수정 없이 대체하는 모델이기 때문에 입출력 집합은 기존의 입출력 집합과 동일하다. 대신, E-FIM 내부는 다수의 충실도 모델들로 구성되지 않고, 하나의 충실도 모델만을 포함한다( $M$ ). E-FIM에서 가장 중요한 기능을 담당하는 모델은 실행 충실도 선택 모델( $ESM$ )으로써  $ESM$ 은 모델 실행의 시간 간격을 조절하여 충실도를 변경한다.  $ESM$ 의 구조는 Fig. 9와 같으며 이에 대한 수학적 형식론은 다음과 같다.

$$ESM = \langle X, Y, F, T, FCP, sf, of \rangle$$

- $X, Y$  : 입력 및 출력 집합

- $F = \left\{ (tr, fr) \mid \begin{array}{l} tr \in Execution\ Time\ Ratio \\ fr \in Fidelity\ Rank \end{array} \right\}$   
: 모델 충실도 집합
- $T$ : 모델 실행 횟수 카운터
- $FCP = \left\{ (S, v) \mid \begin{array}{l} S \in Fidelity\ State\ Variable \\ v \in Change\ Point \end{array} \right\}$   
: 충실도 변화 지점 집합
- $sf$ : 충실도 결정 함수  $F \times FCP \rightarrow F$
- $of$ : 출력 선택 함수  $T \times X \times F \rightarrow T \times Y$

정의한 *ESM*의 형식론 중에서 세 개의 집합( $X$ ,  $Y$ ,  $FCP$ )과 한 개의 함수( $sf$ )는 *BSM*의 경우와 동일하다.  $F$ 의 경우에는 *BSM*의 다양한 충실도를 가진 모델( $M_i$ ) 대신에 실행 시간비( $tr \in Execution\ Time\ Ratio$ )를 정의하였다.  $tr$ 은 모델의 실행 비율을 정의하는데 예를 들어  $tr$ 이 10이면 시뮬레이션 시간 간격(Time step) 별로 모델이 실행된다고 가정하였을 때, 10 번째에만 해당 모델을 실행하여 실행 측면의 충실도를 반영하게 한다. 이러한 경우 시뮬레이션 시간 간격마다 모델의 실행 횟수를 저장하는 변수 집합이 필요한데  $T$ 가 이를 위한 집합이다.  $T$ 는 시뮬레이션 시간 간격마다 순차적으로 갱신된다. 따라서 출력 선택 함수  $of$ 는 입력  $X$ 에 대하여  $T$ 와  $F$ 를 비교하여 조건을 만족할 경우  $T$ 를 초기화 하고  $X$ 를  $M$ 의 입력으로 전달하거나, 그렇지 않을 경우 저장 되어 있는 이전의  $M$ 의 출력을  $E-FIM$ 의 출력으로 보내고  $T$ 를 갱신한다. 예를 들어, 현재 시뮬레이션 시간 간격이 0.01 이고 *ESM*의  $F.tr$ 이 50이면  $M$ 은 0.5 간격으로 실행이 되게 된다.

#### 4.4 다중 충실도 시뮬레이션 알고리즘

기존의 동적 모델의 시뮬레이션 알고리즘은 정해진 시간 간격(Time step)에 따라 모든 모델을 실행한다. 하지만 제안하는 B-FIM과 E-FIM은 내부적으로 다양한 충실도 모델들( $\{M_i\}$ )을 구성요소로 포함하고(B-FIM의 경우), 실행 간격의 유연성을 제공하기 때문에(E-FIM의 경우) 어떠한(혹은 모든) 시간 간격에서 B-FIM과 E-FIM의 내부에 실행해선 안 되는 모델들이 반드시 존재한다. 따라서 전체 모델들에서 현재의 시간 간격에 실행되어야 하는 모델들의 목록인 ActiveModelList를 기존의 시뮬레이션 알고리즘에 추가한다. ActiveModelList는 B-FIM과 E-FIM 내부의 충실도를 변경하는 모델인 *BSM*과 *ESM*에 의하여 갱신되기 때문에 매 시뮬레이션 시간 간격마다 이들을 먼저 실행한 뒤 ActiveModelList 내부의 모델들을

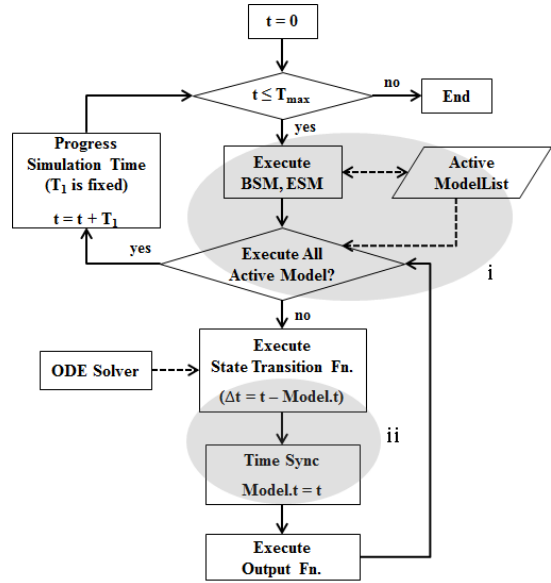


Fig. 10. Simulation algorithm for multi-fidelity model

실행해야 한다. *BSM*과 *ESM*의 실행 및 ActiveModelList가 추가된 시뮬레이션 알고리즘을 Fig. 10의 순서도(Flowchart)로 표현하였다.

Fig. 10의 시뮬레이션 알고리즘은 기본적으로 기존의 시뮬레이션 알고리즘과 동일하게 설정된 최대 시뮬레이션 시간( $T_{max}$ )까지 시간 간격( $T_1$ )마다 모델을 실행하며, 현재 시간을 갱신한다( $t = t + T_1$ ). 다중 충실도 M&S를 적용하기 위해 수정된 부분은 크게 두 가지이다. 첫째로 모든 모델들 중에서 현재 실행해야 하는 모델만 추출하여 실행하기 위해 ActiveModelList와 *BSM*, *ESM* 실행 부분(i)을 추가하였고 이 부분에 대하여서는 앞 단락에서 충분히 설명하였다. 두 번째는 모델 실행시 상태 천의 함수( $f$ )를 Ordinary Differential Equation(ODE) Solver를 통하여 해석하는데 필요한 시구간(Time period) 갱신(ii)이다. 기존의 동적 모델의 시뮬레이션 알고리즘에서는 모든 모델이 시뮬레이션 시간 간격마다 실행되기 때문에 각 모델의 시구간을 시뮬레이션 시간 간격으로 설정하면 된다. 그러나 다중 충실도 모델에서는 현재 시간 간격에서 실행이 되지 않는 모델이 존재하기 때문에 각 모델별로 시구간이 다르게 설정 되어야 한다. 따라서 이를 해결하기 위해 시구간을 마지막 실행 시간과 현재 실행 시간의 차이로 정한다. 예를 들어 시간 간격이 0.1인 시뮬레이션에서 모델이 시각 3에서 마지막으로 실행이 되고 시각 10에서 다시 실행해야 한다면 모델의 시구간은 0.1이 아니



라 10-3인 7이 된다(Fig. 10:  $\Delta t = t - Model.t$ ). 위 두 가지 수정된 부분은 기존의 알고리즘을 확장한 개념이기 때문에 기존 모델의 시뮬레이션에도 무리 없이 활용이 가능하다.

### 4.5 다중 충실도 M&S 기법 적용 예

본 절에서는 예시로 어뢰의 기동 모델과 제어 모델에 대하여 4.2절과 4.3절에서 제안한 B-FIM과 E-FIM을 적용하고 이를 명세한다. 3.2절의 동적 모델 형식문을 기반으로 어뢰의 기동 모델은 수중 물체의 기동을 묘사하는 6자유도 기동 방정식(6 Degree of Freedom Maneuver Equation)(Fossen, 1994)을 적용하여 모델링한 6자유도 기동 모델이며, 제어 모델은 목표의 위치와 어뢰의 위치를 변수로 하여 기동 모델을 제어하기 위해 비례미분 제어 방식을 적용한 제어 모델이다. 각 모델에 대한 구조는 Fig. 11, Fig. 12와 같으며 명세는 다음과 같다.

$$6DOFManeuver = \langle X, S, Y, f, g \rangle$$

- $X = \{ (Ctl, (RPM, \delta_s, \delta_r)) \}$
- $S = \{ u, v, w, p, q, r \}$
- $Y = \{ (T\_POS, (X_T, Y_T, Z_T, \Phi_T, \theta_T, \Psi_T)) \}$
- $f: \frac{d}{dt}S(t) = f(RPM, \delta_s, \delta_r, u, v, w, p, q, r, \Phi, \theta, \Psi)$
- $g: Y(t) = g(X, Y, Z, \Phi, \theta, \Psi, u, v, w, p, q, r, dt)$

6자유도 기동 모델은 제어 모델로부터 오는 제어 값들을 입력으로 받아서 상태 천이 함수 및 출력 함수를 통하여 어뢰의 위치를 출력으로 내보낸다. 입력 집합(X)은 프로펠러 회전 속도를 나타내는 RPM, 승강타(Elevator)의 각도를 나타내는  $\delta_s$ , 방향타(Rudder)의 각도를 나타내는  $\delta_r$ 로 구성되며 Ctl 포트로 들어온다. 출력 집합(Y)은 지구 기준(Earth-fixed) 좌표계에서 어뢰의 위치를 나타내는  $X_T, Y_T, Z_T$ 와 각 축(X, Y, Z)에 대하여 어뢰의 회전 방향을 나타내는  $\Phi_T, \theta_T, \Psi_T$  (Yaw, Pitch, Roll)로 구성되며 T\_POS 포트로 나간다. 6자유도 기동 모델의 상태 집합(S)은 어뢰 기준(Body-fixed) 좌표계에서 각 축에 대한 속도  $u, v, w$ 와 회전 각속도  $p, q, r$ 로 구성되어 있다. 상태 천이 함수(f)는 6자유도 기동 방정식으로 이루어져 있으며 이는 뉴턴의 방정식을 기본으로 하여 추진력, 마찰력, 중력, 부력 등 여러 가지 힘 및 파라미터를 고려하여 어뢰의 속도 변화량을 계산하는 미분 방정식이다. 출력 함수

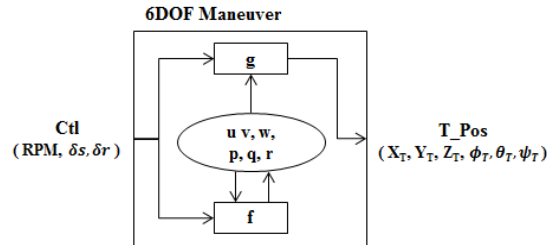


Fig. 11. Specification for 6DOF Maneuver model

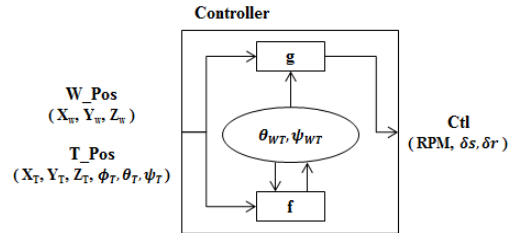


Fig. 12. Specification for Controller model

(g)는 어뢰 기준 좌표계로 계산된 어뢰의 속도를 오일러 변환을 적용하여 지구 기준 좌표계로 변환하고 이를 통하여 어뢰의 위치를 계산하는 함수이다. 자세한 식(f, g) 및 파라미터 값은 Fossen(1994)의 연구를 참고하기 바란다.

$$Controller = \langle X, S, Y, f, g \rangle$$

- $X = \{ ((W\_Pos, (X_W, Y_W, Z_W)), ((T\_Pos, (X_T, Y_T, Z_T, \Phi_T, \theta_T, \Psi_T))) \}$
- $S = \{ \theta_{WT}, \Psi_{WT} \}$
- $Y = \{ (Ctl, (RPM, \delta_s, \delta_r)) \}$
- $f: \frac{d}{dt}S(t) = f(\theta_{WT}, \Psi_{WT}, X_W, Y_W, Z_W, X_T, Y_T, Z_T)$
- $g: Y(t) = g(\theta_{WT}, \Psi_{WT}, RPM, \delta_s, \delta_r, dt)$

제어 모델은 기동 모델로부터 오는 어뢰의 위치 값과 목표 함정의 위치 값을 입력으로 받아서 상태 천이 함수 및 출력 함수를 통하여 어뢰가 목표 함정을 향해서 가도록 하는 제어 값을 출력으로 내보낸다. 입력 집합(X)은 지구 기준 좌표계에서 함정의 위치를 나타내는  $X_W, Y_W, Z_W$ 와 어뢰의 위치를 나타내는  $X_T, Y_T, Z_T, \Phi_T, \theta_T, \Psi_T$ 로 구성되며 각각 W\_POS, T\_POS 포트로 들어온다. 출력 집합(Y)은 앞서 설명한 6자유도 기동 모델의 입력과 동일하다. 제어 모델의 상태 집합(S)은 어뢰의 운동 방향이 목

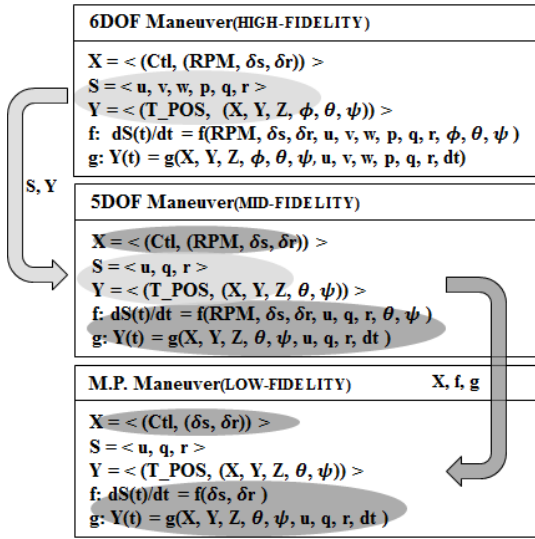


Fig. 13. Fidelity change example in terms of model behaviour: the maneuver sub-model of the engineering-level defense model

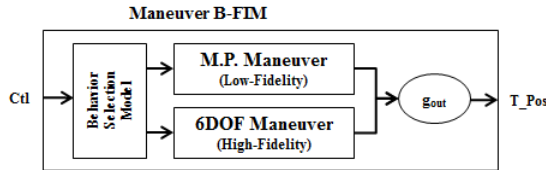


Fig. 14. B-FIM specification for the maneuver model

표 함정의 방향과 얼마나 틀어져 있는지를 나타내는  $\theta_{WT}, \psi_{WT}$ 로 구성되어 있다. 상태 천이 함수( $f$ )는 입력과 현재 상태를 바탕으로 비례미분 제어를 위한 상태 집합의 변화량을 계산하는 미분 방정식이다. 출력 함수( $g$ )는 상태를 바탕으로 하여 제어 값을 계산하는 함수이다.

6자유도 기동 모델에 동작 측면의 다중 충실도를 적용하기 위한 기동 B-FIM을 구성하기 위해선 먼저 충실도 감소 과정 (Fidelity Downgrade)을 적용하여 저 충실도 모델을 개발해야 한다. 충실도 감소 과정은 동작 측면의 다중 충실도 M&S 기법을 적용하려고 하는 기존의 고 충실도 모델을 기준으로 하여 충실도를 낮춘 모델을 개발하는 과정이다. 본 예제에서 고려하는 동적 모델의 충실도는 모델이 실세계의 얼마나 많은 요소들을 고려하고 있는 지에 따라 구분이 가능하며 동적 모델은 3가지의 집합과 2가지의 함수로 실세계의 요소들을 표현한다. 모델의 충실도를 줄이는 것은 실세계를 표현하고 있는 요소들의 정보량을 줄이는 것이며 이는 곧 동적 모델의 3가지 집합

( $X, Y, S$ )과 2가지 함수( $f, g$ )의 정보량을 감소시키는 것이다. 3가지 집합의 경우 정보량을 줄이는 것은 곧 원소의 수를 감소시키는 것이며 저 충실도 모델이 기존 모델의 입력, 출력, 상태 집합의 부분 집합을 입력, 출력, 상태 집합으로 가지는 것이다. 함수의 경우 항의 개수를 줄이거나 동적인 미분 방정식을 정적인 방정식으로 바꾸는 방법 등이 될 수 있다. Fig. 13은 6자 기동 모델에 충실도 감소 과정을 적용하는 것을 나타낸다. 6자유도 기동 모델에서 상태 집합과 출력 집합의 원소 수를 감소시켜서 5자유도 기동 모델을 생성할 수 있으며, 5자유도 기동 모델에서 입력 집합의 원소를 감소시키고 복잡한 상태 천이 함수와 출력 함수를 간단하게 하는 것으로 더 낮은 충실도를 가지는 질점 기동 모델(Material Point Maneuver Model)(Shin, 2007)을 생성할 수 있다. 질점 기동 모델에 대한 명세는 Fig. 13에 나타나 있다. 본 예제에서는 개발된 저 충실도 모델 중 질점 기동 모델과 기존의 6자유도 기동 모델을 사용하여 기동 B-FIM을 구성한다. Fig. 14는 기동 B-FIM의 구조이며 이에 대한 명세는 아래와 같다.

$$Maneuver\ B-FIM = \langle X, Y, \{M_i\}, BSM, g_{out}, MCS \rangle$$

- $X = \{ (Ctl, (RPM, \delta_s, \delta_r)) \}$
- $Y = \{ (T\_POS, (X_T, Y_T, Z_T, \Phi_T, \theta_T, \Psi_T)) \}$
- $\{M_i\} = \{ M.P. Maneuver, 6DOF Maneuver \}$
- $g_{out} : \{ X_T, Y_T, Z_T, \theta_T, \Psi_T \} \rightarrow \{ X_T, Y_T, Z_T, \Phi_T = 0, \theta_T, \Psi_T \}$

$$BSM = \langle X, Y, F, FCP, sf, bf \rangle$$

- $X = \{ (Ctl, (RPM, \delta_s, \delta_r)) \}$
- $Y = \{ (Ctl_H (RPM, \delta_s, \delta_r), (Ctl_L, (\delta_s, \delta_r)) \}$
- $F = \{ (6DOF Maneuver, 0), (M.P. Maneuver, 1) \}$
- $FCP = \{ (TWDistance, 3000) \}$
- $sf : \text{if } (F.fr \equiv 1 \ \&\& \ TWDistance \leq 3000) \text{ then } F.fr \equiv 0 \text{ else } F.fr \equiv 1$
- $bf : Ctl \times (6DOF Maneuver, 0) \rightarrow Ctl_H$   
 $Ctl \times (M.P. Maneuver, 1) \rightarrow Ctl_L$

B-FIM의 입력과 출력 집합( $X, Y$ )은 기존의 고 충실도 모델인 6자유도 기동 모델과 동일하며 다양한 충실도를 가진 내부 모델( $\{M_i\}$ )은 6자유도 기동 모델과 질점 기동 모델로 구성되어 있다. 저 충실도 모델인 질점 기동 모델

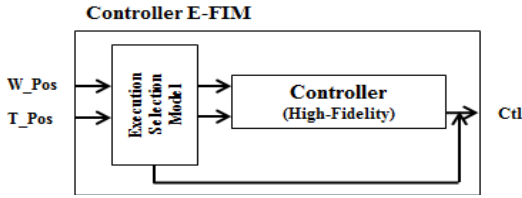


Fig. 15. E-FIM specification for the controller model

의 출력을 B-FIM의 출력으로 변환하기 위한 출력 변환 함수( $g_{out}$ )는 질점 기동 모델의 출력이 포함하지 않는 원소( $\Phi_T$ )에 대하여 간단하게 0의 값을 지정한다. BSM은 입력을 받아 충실도에 따라 선택된 내부 모델에 맞게 변환하여 전달하기 때문에 BSM의 입력 집합( $X$ )은 B-FIM과 동일하며 출력 집합( $Y$ )은 내부 모델들의 입력 집합의 합집합과 동일하다. 모델 충실도 집합( $F$ )은 고 충실도 등급( $F.fr = 0$ )의 6자유도 기동 모델과, 저 충실도 등급( $F.fr = 0$ )의 질점 기동 모델로 구성되어 있다. FCP의 충실도 상태 변수( $S$ )는 ‘어뢰와 함정 사이의 거리’, 변경 지점( $v$ )은 3000m로 정한다. 이에 따라 충실도 결정 함수( $sf$ )는 어뢰와 함정 사이의 거리가 3000m 초과일 때는 저 충실도 등급( $F.fr = 1$ )에 해당하는 질점 기동 모델을 선택하며, 3000m 이하일 때는 고 충실도 등급에 해당하는 6자유도 기동 모델을 선택한다. 입력 전달 함수( $bf$ )는 6자유도 기동 모델이 선택되었을 때는 BSM의 입력을 그대로  $Ctrl_H$  포트를 통하여 모델에 전달하며 질점 기동 모델이 선택되었을 때는 입력을 질점 기동 모델의 입력에 맞게 변환하여  $Ctrl_L$  포트를 통하여 모델에 전달한다.

Controller E-FIM =  $\langle X, Y, M, ESM, MCS \rangle$

- $X = \left\{ \begin{aligned} & (W\_Pos, (X_W, Y_W, Z_W)), \\ & (T\_Pos, (X_T, Y_T, Z_T, \Phi_T, \theta_T, \Psi_T)) \end{aligned} \right\}$
- $Y = \{ (Ctrl, (RPM, \delta_s, \delta_r)) \}$
- $M = Controller$

ESM =  $\langle X, Y, F, T, FCP, sf, of \rangle$

- $X = \left\{ \begin{aligned} & (W\_Pos, (X_W, Y_W, Z_W)), \\ & (T\_Pos, (X_T, Y_T, Z_T, \Phi_T, \theta_T, \Psi_T)) \end{aligned} \right\}$
- $Y = \left\{ \begin{aligned} & (Ctrl, (RPM, \delta_s, \delta_r)), (W\_Pos, (X_W, Y_W, Z_W)), \\ & (T\_Pos, (X_T, Y_T, Z_T, \Phi_T, \theta_T, \Psi_T)) \end{aligned} \right\}$
- $F = \{ (1, 0), (50, 1) \}$

- $FCP = \{ (TWDistance, 3000) \}$
- $sf: \text{if}(F.fr = 1 \ \&\& \ TWDistance \leq 3000)$   
     then  $F.fr = 0$   
     else  $F.fr = 1$
- $bf: \text{if}(T < F.tr)$   
     then  $T = T + 1, Y = \{ Ctrl \}$   
     else  $T = 0, Y = \{ T\_Pos, W\_Pos \}$

Fig. 15는 제어 모델에 실행 측면의 다중 충실도를 적용하기 위해 구성한 제어 E-FIM의 구조이며 이에 대한 명세는 위와 같다. E-FIM의 입력과 출력 집합( $X, Y$ )은 기존의 제어 모델과 동일하며 실행 시간 간격을 조정할 대상 모델( $M$ )은 E-FIM을 적용하는 기존의 제어 모델이다. ESM은 입력을 받아  $M$ 에 전달하거나 E-FIM의 출력을 내보내기 때문에 입력 집합( $X$ )은 E-FIM과 동일하며 출력 집합( $Y$ )은 E-FIM의 출력 집합과  $M$ 의 입력 집합의 합집합과 동일하다. B-FIM의 경우와 달리 모델 충실도 집합( $F$ )은 고 충실도 등급( $F.fr = 0$ )인 1의 실행 시간비( $F.tr$ )와 저 충실도 등급( $F.fr = 1$ )인 50의 실행 시간비로 구성된다. 즉 고 충실도의 경우 시뮬레이션 시간 간격마다  $M$ 이 실행되고 저 충실도의 경우 시뮬레이션 시간 간격의 50배 시간 간격마다  $M$ 이 실행된다. FCP,  $sf$ 는 B-FIM과 동일하며 출력 선택 함수( $of$ )는 모델 실행 횟수 카운터( $T$ )가 현재 선택된 충실도 등급의 실행 시간비( $F.tr$ )보다 적을 경우에는  $M$ 을 실행 시킬 때가 아니므로  $T$ 를 증가시키고,  $Ctrl$  포트로 이전의  $M$ 의 출력을 내보낸다. 반면에  $T$ 가  $F.tr$ 과 같아질 경우  $M$ 을 실행시킬 때이므로  $T$ 를 0으로 초기화하고  $W\_POS, T\_POS$  포트로 ESM의 입력을  $M$ 으로 전달한다.

## 5. 사례 연구

본 논문에서 제안하는 다중 충실도 M&S 기법을 어뢰의 표적 추적 시나리오에 적용하였다. 본 사례 연구의 목적은 일정 수준의 효과도 지수(추적 성공률)을 유지하면서 시뮬레이션 성능을 향상시키는 것이다. 이를 위해 실험 시나리오, 모델 설계/구현, 실험 설계, 실험 결과/고찰 순으로 설명한다.

### 5.1 실험 시나리오

본 실험에서 사용하는 어뢰의 표적 추적 시나리오를 Fig. 16을 통해 도시화하였다. 잠수함은 함정으로부터 직선거리로 10000m 떨어진 상태에서 표적(함정)을 향해 어뢰를 발사하고 발사된 어뢰는 최대 36knot 로 기동하며

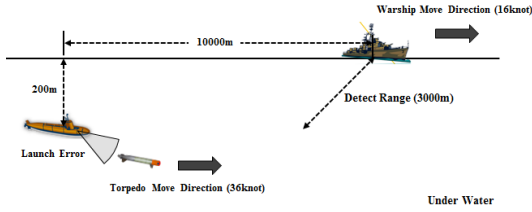


Fig. 16. Experimentation: a target tracking scenario

함정을 추적한다. 함정은 잠수함과 같은 방향으로 8knot의 속도로 기동하는데 어뢰 탐지 반경(3000m) 내에 어뢰가 접근하면 방향을 90도 바꾸어 16knot로 회피 기동한다. 본 시나리오에서는 간단히 어뢰가 표적(함정)의 정확한 위치를 잠수함으로부터 전달 받는다고 가정하고 전달 받은 위치(표적 위치)를 향해 어뢰가 얼마나 성공적으로 추적하는지를 분석한다.

### 5.2 모델 설계 및 구현

Fig. 17는 본 실험 시나리오에 대한 모델 설계를 나타낸다. 표적 추적 시뮬레이션(Target tracking simulation) 모델은 잠수함(Submarine), 함정(Warship) 그리고 어뢰(Torpedo) 모델을 전투 개체 모델로 포함한다. 기본적으로 모든 전투 개체 모델은 내부적으로 기동, 제어, 탐지 하위 모델로 구성되지만 5.1절을 통해 어뢰는 표적의 위치를 항상 잠수함으로부터 전달 받는다고 가정하였기 때문에 어뢰 모델의 경우 기동과 제어, 두 개 하위 모델로만 구성된다. 어뢰 제어 모델은 잠수함으로부터 전달 받은 표적의 위치와 자신의 운동 모델로부터 전달 받은 어뢰의 위치를 바탕으로 표적에 올바르게 접근할 수 있도록 추적 방향 및 속도 등을 결정하여 기동 모델에 전달하는 역할을 수행하고 기동 모델은 전달 받은 제어 명령으로 바탕으로 실제 기동 방정식을 수행하여 어뢰의 현재 위치를 갱신한다. 본 실험의 어뢰 제어/기동 모델은 기본적으로 4.5절에서 명세한 제어 알고리즘과 6자 운동 방정식을 모델로 구현 하였다.

표적 추적 시나리오에서 가장 중요한 모델은 어뢰 모델이기 때문에 본 실험은 어뢰 모델에 한하여 제안하는 다중 충실도 기법을 적용하였다. Fig. 18은 다중 충실도를 적용한 어뢰 모델을 나타낸다. 어뢰의 제어 모델은 모델 실행 측면의 다중 충실도 M&S 기법을 적용하기 위해 기존의 제어 모델 대신 제어 E-FIM을 삽입하고, 기동 모델은 모델 동작 측면의 다중 충실도 적용을 위해 기동 B-FIM을 삽입하였다. 삽입된 제어 E-FIM과 기동 B-FIM

### Target tracking Simulation

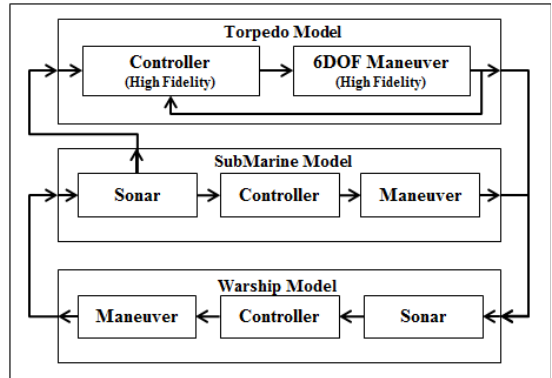


Fig. 17. Overall model design for target tracking scenario

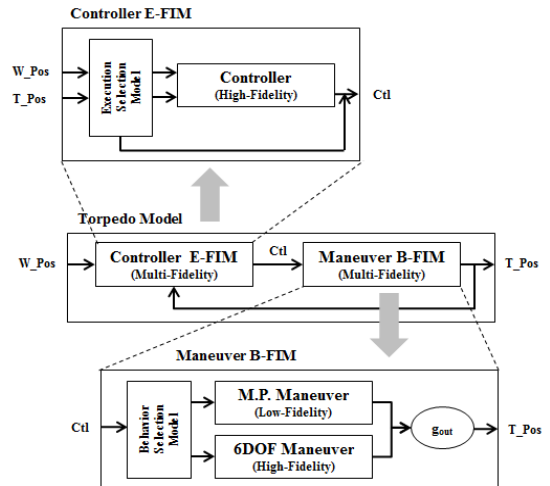


Fig. 18. Multi-fidelity models: the maneuver and the controller sub-models of the torpedo model

은 4.5절의 모델 명세를 기반으로 구현하였다. 그리고 모든 모델은 객체 지향 프로그래밍 언어인 C++ 기반으로 구현되었다.

### 5.3 실험 설계

실험은 어뢰 모델의 적용 부분에 따라 3 가지로 구분된다(Table 3 참조). 먼저, 실험 1(Exp. 1)은 모델 동작 측면의 다중 충실도 기법을 어뢰의 운동 모델에 적용한 실험이고, 실험 2(Exp. 2)는 모델 실행 측면을 제어 모델에 적용하였으며, 실험 3(Exp. 3)은 실험 1과 2를 혼합 적용하였다. 모든 실험에 대하여 FCP의 충실도 상태 변수(S)는 함정과 어뢰 사이의 거리로 설정하였으며 최적의 변경

Table. 3. Experimental design

Experiment	Viewpoint	Applied Part	$FCP.v$ (m)	Measuring Index
Exp. 1	Model Behavior	Maneuver	250 500	Tracing Success Rate**, Simulation Execution Time
Exp. 2	Model Execution	Controller	1000	
			2000	
Exp. 3	Behavior/ Execution*	Maneuver/ Controller	3000	
			4000	
			5000	

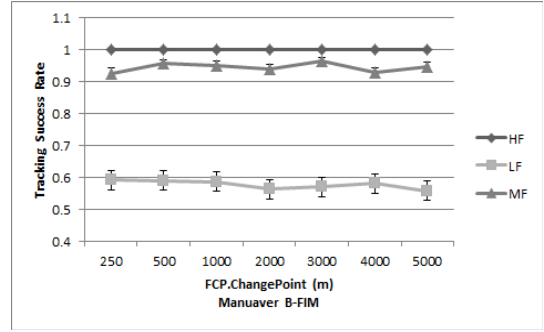
\*Both models(Maneuver and controller) are applied to designed  $FCP.v$

\*\*Simulation is repeated 1000 times for 95% confidence intervals

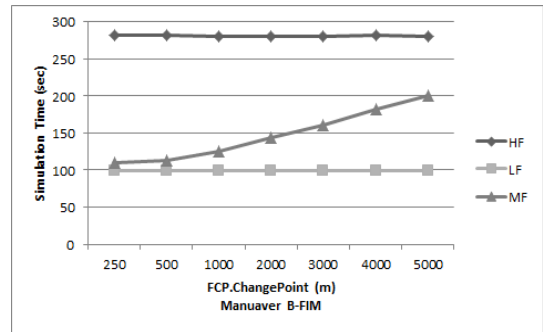
지점을 실험적으로 찾기 위하여  $FCP$ 의 충실도 변경 지점( $v$ )를 총 7개 수준으로 설계하였다. 본 실험의 구현 모델은 어뢰 발사 및 제어 시 오차 변수를 포함하는 확률 기반 모델이기 때문에 각 실험 시나리오(예: 실험 1의  $v$ 가 250인 경우)에 대하여 1000번의 어뢰 발사를 통하여 추적 성공률(Tracing success rate)을 구하고 이에 대한 시뮬레이션 실행 시간(Simulation execution time)을 측정하였다. 시뮬레이션 실행 시간은 전체 모델의 계층적 모델 구조로 인한 영향을 제외하기 위해 다중 충실도 기법을 적용한 어뢰 모델에 대해서만 실행 시간을 측정하였다. 각 실험에 대한 측정 지수(Measuring index)는 추적 성공률과 시뮬레이션 실행 시간이며 최종적으로 E-FIM과 B-FIM에 대한 최적의  $v(FCP.v, BSM$ 의 수학적 형식론 참조)를 구하고 이 경우에 시뮬레이션 실행 시간이 얼마나 단축되는지 알아보았다. 다중 충실도 모델의 고 충실도 모델에 대한 시뮬레이션 정확도의 허용 오차 범위는 0.04이며 시뮬레이션 엔진의 시간 진행 간격은 0.01이다.

### 5.4 실험 결과 및 고찰

Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21은 각각 실험 1, 2, 3에 대한 실험 결과를 나타낸 그래프이다. 각 그래프에서 실험군은 다중 충실도(MF) 모델의 결과이고, 대조군으로 기존의 고 충실도(HF) 모델들을 이용한 시뮬레이션과 저 충실도(LF) 모델만을 이용한 시뮬레이션으로 설정하였다. LF의 경우 기동 B-FIM와 제어 E-FIM의  $v$ 를 0으로 함으로써 시뮬레이션 도중 충실도 변경 없이 저 충실도 모델로만 실행 되도록 하였다. Fig. 19(a), Fig. 20(a)는 실험군과 대조군에 대하여  $v(x$ 축)의 변화에 따른 추적 성공률( $y$ 축)을 측정된 그래프이고 Fig. 19(b), Fig. 20(b)는 같은



(a) Tracking success rate according to various  $FCP$  change points( $v$ )



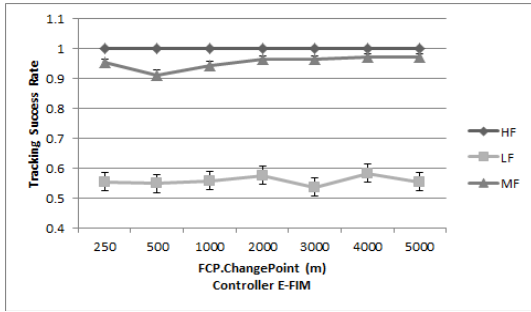
(b) Simulation execution time according to various  $FCP$  change points( $v$ )

Fig 19. Results of experiment 1: LF, MF, and HF

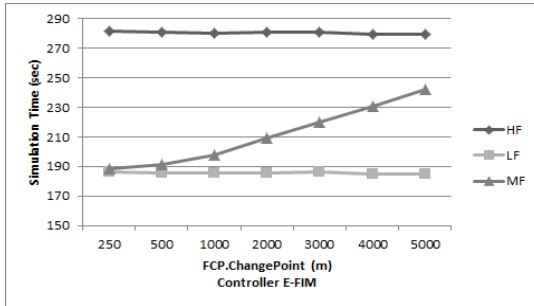
경우에 대하여 시뮬레이션 실행 시간( $y$ 축)을 측정된 그래프이다.

Fig. 19는 모델 동작 측면의 다중 충실도 M&S 기법에 관한 실험 결과(실험 1)이다. 실험 1의 대조군들을 먼저 살펴보면 추적 성공률과 시뮬레이션 실행 시간 측면 모두 LF와 HF는 많은 차이를 보임을 알 수 있다. LF의 경우 실행 시간은 HF에 비해 2.7배 정도 짧다. 하지만 추적 성공률이 최대 0.6로 측정되었고(HF의 추적 성공률: 1), 이는 LF 모델이 표적을 정확히 추적하지 못함을 알 수 있고 LF 모델을 이용한 M&S 기반 분석은 의미 있는 측정 지수를 얻지 못함을 의미한다. 이 경우, 본 논문에서 제안하는 기법을 적용한 MF는 좋은 대안을 제시한다. 그림 12(a)를 보면 MF는  $v$ 의 값에 따라서 대체적으로 HF와 비슷한 높은 추적 성공률을 보이고 있으며 실행 시간은 HF에 비하여 적은 것을 볼 수 있다. 기동 B-FIM만 적용할 때 시뮬레이션 정확도 허용 오차 범위 내에서 최소의 실행 시간을 갖는 기동 B-FIM의 최적  $v$ 는 3000m이며 이때 약 1.75배의 시뮬레이션 시간 단축을 보인다. MF가





(a) Tracking success rate according to various FCP change points( $v$ )



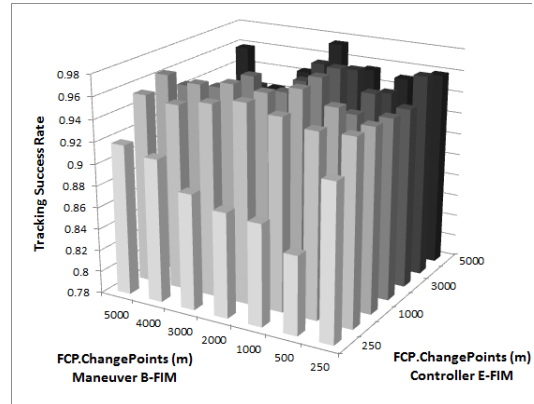
(b) Simulation execution time according to various FCP change points( $v$ )

Fig. 20. Results of experiment 2: LF, MF, and HF

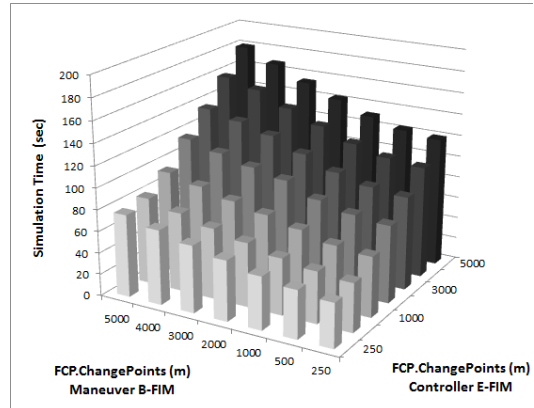
HF와 정확히 동일한 결과를 내지 못하는 것은 질점 기동 모델에서 6자유도 기동 모델로 변경되는 시점에서 어뢰 모델의 동적 특성이 미세한 오차를 보이고 이것이 전체 추적의 궤적에 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 20은 모델 실행 측면의 다중 충실도 M&S 기법에 관한 실험 결과(실험 2)이며 전반적인 경향성은 실험 1과 동일하다. 실험 1과 마찬가지로 실험 2에서 제어 E-FIM만 적용할 때 이의 최적  $v$ 는 2000m이며 이때 약 1.33배의 시뮬레이션 시간 단축을 보인다.

마지막으로 Fig. 21는 모델 동작 측면과 실행 측면의 다중 충실도 M&S 기법에 관한 실험 결과(실험 3)이다. 그림 Fig. 21(a), Fig. 21(b)의  $x$ 축,  $y$ 축은 각각 모델 동작과 실행 측면에서 적용하고자 하는  $v$ 를 나타내고,  $z$ 축은 측정 지수들을 나타낸다. 실험 결과의 전반적인 경향성은 실험 1, 2와 동일하며 특히, 실험 3의 경우에는 모델 동작과 실행 측면 모두 다중 충실도 기법을 적용하였기 때문에 각각 적용한 실험 1과 2에 비하여 높은 시뮬레이션 성능 향상을 얻을 수 있다. 기동 B-FIM과 제어 E-FIM 각각의 최적  $v$ 는 모두 1000m이며 이때 약 4.24배의 시뮬



(a) Tracking success rate according to various FCP change points( $v$ )



(b) Simulation execution time according to various FCP change points( $v$ )

Fig. 21. Results of experiment 3: MF

레이션 시간 단축을 보인다. 기동 B-FIM과 제어 E-FIM을 각각 적용했을 때에 비하여 최적  $v$ 가 달라지는 것은 기동과 제어 모델이 서로 영향을 주고받기 때문이다.

실험 1-3의 최적  $v$ 에 대한 추적 성공률과 시뮬레이션 실행 시간을 Table 4를 통해 정리하였다. 실험 1-3에서 최대 시뮬레이션 시간 단축은 1.75, 1.33, 4.24배로 측정되었다. 따라서 본 실험 결과는 M&S 기반 분석의 시뮬레이션 성능 향상을 위해 제안하는 다중 충실도 기법이 좋은 대안이 될 수 있음을 보인다.

## 6. 결론

본 논문은 M&S 기반 시스템 분석 시 시뮬레이션 성능 향상을 달성할 수 있는 방안으로 다중 충실도 M&S 기법

**Table 4.** Optimized cases of all experiments

	HF (Control Group)	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 3
<i>FCP.v</i> (m)		3000	2000	1000 1000
Degree of Accuracy	1	0.966	0.965	0.97
Simulation Execution Time (sec)	280	160	210	66

을 제안하였다. 제안하는 기법은 모델의 동작과 실행 측면에서 다중 충실도를 적용할 수 있고 이를 위해 모델 구조 및 형식론, 그리고 시뮬레이션 알고리즘을 제안하였다. 특히, 제안하는 B-FIM과 E-FIM은 변경하고자 하는 모델을 대신하여 플러그인 (Plug-in)됨으로써, 기존의 모델을 전혀 수정하지 않고 사용할 수 있는 장점이 있다.

본 연구의 효용성을 입증하기 위해 사례 연구로 기초 실험을 진행하였다. 사례 연구는 어뢰의 표적 추적 시나리오로써 제안하는 기법을 적용하였을 경우 유사한 수준의 추적 성공률을 보장하면서 시뮬레이션 성능 측면에서는 최대 4.24배의 이득을 보였다. 본 사례 연구는 충실도를 변경시키는 *FCP*를 수동적으로(Manually) 변경시키면서 최적화된 값을 실험적으로 추정하였는데, 추후 연구로는 *FCP*를 시뮬레이션 상황에 따라 지능적(Intelligent)으로 변경할 수 있도록 진행할 예정이다.

그동안 다중 충실도를 M&S에 적용한 연구들은 시뮬레이션 기반 학습/훈련 등과 실시간 시뮬레이션에서 많이 연구되었지만 시뮬레이션 분석에는 활용되지 않았다. 이에 본 논문은 다중 충실도를 M&S 기반 시스템 분석에 활용하는 초기 연구로써 명확한 이론적 근거와 접근 방법을 제시하였다. 현재의 대상 시스템은 공학급 국방 모델이었지만 다른 많은 분야의 모델에 적용될 수 있음을 기대하고, 특히 동적 특성을 지닌 다양한 모델에 대하여 보다 효율적으로 시뮬레이션을 수행할 수 있는 도구로 활용될 수 있기를 기대한다.

## References

1. Kim, T.G., "Modeling and Simulation Engineering", Communication of the Korea Information Science Society, Vol. 14, No 6, pp. 3-17, 2007.
2. Kim, J.H., Moon, I.C., and Kim, T.G., "New insight into

doctrine via simulation interoperation of heterogeneous levels of models in battle experimentation", Simulation: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International, Vol. 88, No. 6, pp. 649-667, 2012.

3. Seo, K.M., Song, H.S., Kwon S.J., and Kim, T.G., "Measurement of Effectiveness for an Anti-torpedo Combat System Using a Discrete Event Systems Specification-based Underwater Warfare Simulator", The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 157-171, 2011.
4. Kweon, S.J. and Kim, T.G., "Design, Implementation and Performance Analysis of Event-oriented Execution Environment for DEVS", Journal of the Korea Society for Simulation, Vol. 20, No. 1, pp. 87-96, 2011.
5. Hong, J.H., Seo, K.M., and Kim, T.G., "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, pp. 362-380, 2013.
6. Kim, T.G., Theory and Technology of Defense M&S - Introduction, 2013 An Open Lecture for Industry-academic Cooperation, SMSLAB, KAIST, 2013.
7. Ryoo, E.N., Ha, E.H., and Cho, J.Y., "Comparison of Learning Effects using High-fidelity and Multi-mode Simulation: An Application of Emergency Care for a Patient with Cardiac Arrest", Journal of Korean Academy of Nursing, Vol. 43, No. 2, pp. 185-193, 2013.
8. Kim, C.J., Yang, C.D., Kim, S.H., and Hwang, C., "The Analysis of Helicopter Maneuvering Flight Using the Indirect Method - Part II. Applicability of High Fidelity Helicopter Models", Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 36, No. 1, pp. 31-38, 2008.
9. Vitali, R., Haftka, R.T., and Sankar, B.V., "Multi-fidelity design of stiffened composite panel with a crack", Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 23, No, 5, pp. 347-356, 2002.
10. Gano, S.E., Simulation-based design using variable fidelity optimization, Ph.D Thesis, University of Notre Dame, pp. 14-30, 2005.
11. Fossen, T.I., Guidance and control of ocean vehicles, John wiley & sons, New York, NY, pp. 447-452, 1994.
12. Lim, S.Y. and Kim, T.G., "Hybrid Systems Modeling and Simulation - Part I: Modeling and Simulation Methodology", Journal of the Korea Society for Simulation, Vol. 10, No. 3, pp. 1-14, 2001.
13. Shin, J.H., "On the Development of Authoritative

Representation of Torpedo Systems for Engagement Level Simulation”, Journal of the Korea Society for Simulation, Vol. 16, No. 3, pp. 19-28, 2007.

14. Hong, J.H. and Kim, T.G., “Interoperation between Engineering- and Engagement-level Models for System Effectiveness Analysis”, Journal of the Korea Institute

of Military Science and Technology, Vol. 19, No. 4, pp. 184-187, 2010.

15. Seo, K.M. and Song, H.S., “Importance Sampling Embedded Experimental Frame Design for Efficient Monte Carlo Simulation”, Journal of the Korea Contents Association, Vol. 13, No. 4, pp. 53-63, 2013.



**최 선 한** (shchoi@smslab.kaist.ac.kr)

2012 한국과학기술원 전기및전자공학과 학사  
2012~현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사과정

관심분야 : 다중 충실도 M&S, 기계 학습, 빅 데이터 분산 처리 시스템



**서 경 민** (kmseo.kumsung@gmail.com)

2006 부산대학교 전기전자통신 공학부 학사  
2008 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사  
2008~현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사과정

관심분야 : 국방 모델링/시뮬레이션, 교전 효과도 분석, 이산 사건 시스템



**권 세 중** (sjkwon@smslab.kaist.ac.kr)

2009 한국과학기술원 전산학과 학사  
2011 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사  
2011~현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사과정

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 시뮬레이션 엔진 구현, 하이브리드 시뮬레이션



**김 탁 곤** (tkim@ee.kaist.ac.kr)

1975 부산대학교 전자공학과 학사  
1980 경북대학교 전자공학과 석사  
1988 Univ. of Arizona, 전기및컴퓨터공학과 박사  
1980~1983 부경대학교, 통신공학과, 전임강사  
1987~1989 (미)아리조나 환경연구소, 연구엔지니어  
1989~1991 Univ. of Kansas, 전기및컴퓨터공학과, 조교수  
1991~현재 KAIST 전자전산학과, 교수

- 한국시뮬레이션 학회 회장 역임
- 국제시뮬레이션학회(SCS) 논문지(Simulation) Editor-In-Chief 역임
- SCS Fellow
- 모델링 시뮬레이션 기술사(미국)
- Who's Who in the World (Marguis 16thEdition, 1999) 등재
- 연합사, 국방부/합참, 기품원 자문위원 역임
- KIDA Fellow 역임
- ADD 자문위원(현)

관심분야 : 모델링/시뮬레이션 이론, 방법론 및 환경개발, 시뮬레이터 연동