

# 실사격 시험시스템의 효율적인 개발을 위해 안전도 반영을 통해 개선된 시스템 성숙도 모델에 관한 연구

예 성 혁\* · 이 재 천\*\*

\*국방과학연구소 제8기술연구본부 · \*\*아주대학교 시스템공학과

## On an Enhanced Model of System Readiness Level by Incorporating Safety for the Development of Live Fire Test Systems

Sung Hyuck Ye\* · Jae-Chon Lee\*\*

\*8<sup>th</sup> Research and Development Institute, Agency for Defense Development

\*\*Dept. of Systems Engineering, Ajou University

### Abstract

The live fire test has been playing a critical role in evaluating the goals-to-meet of the weapon systems which utilize the power of explosives. As such, the successful development of the test systems therein is quite important. The test systems development covers that of ranges and facilities including system-level key components such as mission control, instrumentation or observation, safety control, electric power, launch pad, and so on. In addition, proper operational guidelines are needed with well-trained test and operation personnel. The emerging weapon systems to be deployed in future battle field would thus have to be more precise and dynamic, smarter, thereby requiring more elaboration. Furthermore, the safety consideration is becoming more serious due to the ever-increasing power of explosives. In such a situation, development of live fire test systems seems to be challenging. The objective of the paper is on how to incorporate the safety and other requirements in the development. To achieve the goal, an architectural approach is adopted by utilizing both the system components relationship and safety requirement when advanced instrumentation technology needs to be developed and deteriorated components of the range are replaced. As an evaluation method, it is studied how the level of maturity of the test systems development can be assessed particularly with the safety requirement considered. Based on the concepts of both systems engineering and SoS (System-of-Systems) engineering process, an enhanced model for the system readiness level is proposed by incorporating safety. The maturity model proposed would be helpful in assessing the maturity of safety-critical systems development whereas the costing model would provide a guide on how the reasonable test resource allocation plan can be made, which is based on the live fire test scenario of future complex weapon systems such as SoS.

**Keywords :** Range Safety, System Readiness Level, Live-fire Test, FEMA, Safety Critical System

†Corresponding author: Prof. Jae-Chon Lee, Dept. of Systems Engineering, Ajou University, Wonchon-dong, Youngtong-gu, Suwon, 443-749. E-mail: jaelee@ajou.ac.kr  
Received July 20, 2015; Revision Received September 23, 2015; Accepted September 23, 2015.

## 1. 서론

무기체계 연구개발은 국가 전략에 따라서 개발되는 고속도로, 원전 건설과 같이 다양한 시스템이 참여하는 복합 시스템 연구개발 전략 기반을 기반으로 수행되고 있다. 운용기간을 포함한 전 수명주기가 일반 민간 개발 시스템과 비교할 때, 개념설계부터 폐기까지의 기간의 수십 년에 달하며, 운용기간을 포함한 전체 비용은 천문학적인 비용에 달하기도 한다. 효율적이고 효과적으로 개발업무를 수행하기 위하여 무기체계 연구개발 과정은 요구조건 개발 및 사업 관리를 중시하는 시스템 공학기반의 개발 방식을 적용하고 있다. 연구개발 과정 중 개발자의 요구 성능과 군과 같은 사용자의 요구 만족도를 확인하는 개발 시험과 운용 시험을 수행하는 시험평가 단계는 연구개발과 별개의 고유 영역으로 간주되기도 하였으나, 복잡해지고 정밀해지는 무기체계의 변화에 따라서 성공적인 시험평가를 위해서는 개발초기부터 시험평가의 고려가 요구되고 있다.

Bell(2010)은 연구개발 개념 연구 단계에서의 시험평가의 초기 참여를 통한 위험요소 저감을 제안하였으며, Brian(2012)과 Raymond(1996)은 체계적인 시험수행 방안과 함께 적기 시험평가 수행 절차에 대하여 제시하였다 [1,2,3,6]. 시험평가 단계에서 실제 전투 환경과 유사한 환경을 구축하여 운용성 확인을 수행하는 실사격 시험(Live Fire Test)이 요구되는데, 시스템 단위의 시시험 과정으로서 요구 성능 확인, 운용성 검증 목적의 시험평가 이외에 주기적인 군의 훈련과 신뢰성 시험 목적으로 수행된다[4,5,6]. 무기체계 시험장은 실사격 시험을 수행하는 시설로서 발사시설, 통제 시설, 계측시설 외에 통신, 전기, 기상 등 기반 시설 등을 포함하므로 복잡한 시스템(Systems of system)으로 정의할 수 있다[3]. 시험수행체계 즉 시험장은 시험과정 중에 폭발, 분리 등 화학적, 물리적인 위해 요소를 발생하므로 상시 안전 기능 등 안전성 평가를 실시하고 있으나, 시험수행을 위한 시험 설계에 반영 정도를 확인하기 어렵다는 문제를 내포하고 있다. 시험장에 대한 조직적 평가를 위하여 류충호, 유병직은 [9,10]에서 CMMI 적용 방안을 제시 하였고, 이재천[10]은 안전 절차를 고려한 시험 수행 아키텍처 설계를 제시하였으나, 정량적인 성숙도 평가는 제시하지 못하였다. 참고문헌[11, 12, 13]에서는 국방 연구개발의 성숙도를 정량적으로 판단하기 위한 방안으로 시스템 성숙도 평가를 제시하였으며, 이를 통하여 정량적인 평가 방안 및 적용 방안이 연구 중에 있다.

안전도를 강조하는 복잡한 시스템에 대하여 기존 연

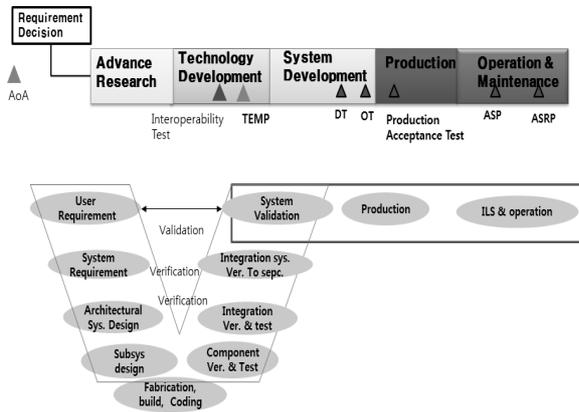
구에서 제안하지 않았던 안전을 고려한 시스템 성숙도 모델을 본 연구에서는 제안하고자 한다. 본 논문의 구성은 1장 서론에 이어, 2장에서는 문제점 및 관련 문헌에 대한 선행연구 분석과 문제 정의를 3장에서는 연구 목표 수행을 위한 연구 방안을 4장에서는 사례 연구를 통한 시스템 성숙도 및 안전도 평가 방안에 대하여 기술하였으며, 마지막 결론 부분에서는 기대효과 및 향후 연구방안에 대하여 기술하였다.

## 2. 문제 정의

### 2.1 무기체계 시험 환경 및 시험

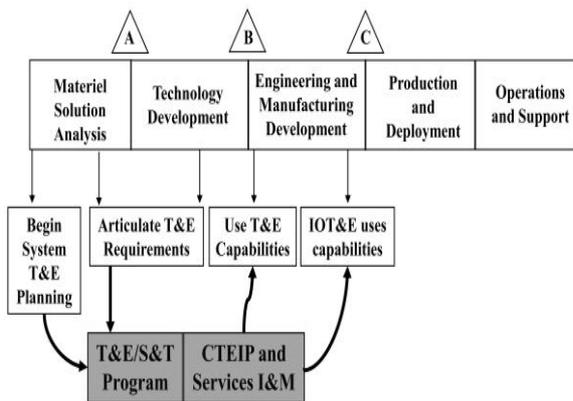
미래 전장에서 운용되는 무기체계는 정밀화, 대형화, 다 차원화와 함께 천문학적인 획득 비용으로 인한 고가화로 정의할 수 있다. 정밀도 증가를 위한 무기체계의 전자장비 적용의 증가와 소프트웨어 기반의 시스템 구성과 전자전 능력 확보 등 과거 전장 운영 환경에서 고려되지 않은 새로운 기능의 요구는 무기체계 개발 비용과 획득 비용의 기하급수적인 증가로 이어졌으며, 시험 대상체의 비용증가는 시스템 단위의 시험인 실사격 시험의 비용 증가로 인하여 한정된 최소화 수량의 시험을 통하여 요구 성능 검증과 확인이 가능하면서 시험 신뢰도 높여야만 되는 어려움에 직면해있다.

무기체계 연구 개발을 위한 전 수명 주기는 미 국방성의 DoD 6000.02에서 한국에서는 방위사업관리규정에서 정의하였는데, 전수명주기에 대한 주요 실사격 시험 수행 범위는 개발시험(Developmental Test), 운용 시험(Operational Test), 운용 중 성능시험과 배치를 위한 생산품에 대한 수락시험(Product Acceptance Test), 운용 중의 성능과 군의 운용성 훈련을 목적으로 시행되는 ASP(Annual Service Program)이나 장기 저장된 무기체계 성능을 확인하는 ASRP(Ammunition Stockfile Reliability Program)로 구분할 수 있다. [Figure 1]은 국내 무기체계 연구개발 수명주기에 대한 주요 실사격 시험 시기를 V-model를 기반으로 나타낸 것이다.



[Figure 1] A comparative view of the two life-cycle models for weapon systems development: the defense acquisition model in Korea and the popular V-model.

무기체계 전 수명주기를 걸쳐 수행되는 실사격 시험을 수행하는 시험장에서 성공적으로 효율적으로 시험을 수행하면서 안전을 지속적으로 유지하기 위해서는 자체적인 업무 성숙도를 높이는 노력이 요구된다. 성공적인 시험 수행을 위해서 선행연구 단계에서부터 시험 평가의 참여가 요구되며, 새로운 무기체계 연구와 병행하여 새로운 시험평가 소요 기술 개발을 위하여 시험평가 과학기술(Science & Technology) 사업을 통하여 구체화 하고자 노력 중에 있다[8]. [Figure 2]는 참고 문헌에서 나타난 미국 국방 연구개발 수명주기 기반의 시험평가 기술 및 능력 개발 시기를 나타낸 것으로서 개념 연구시 시험 평가를 고려하여 성능 검증을 위한 시험 핵심 기술 확보 및 인프라 투자가 이루어지고 있다. 국내에서는 이와 같은 무기체계 시험평가 핵심기술 및 능력 확보 방안을 보유하고 있지 못한 실정이다.



[Figure 2] T&E capabilities development cycle[8]

### 2.3 무기체계 기술 성숙도 판단

무기체계 연구개발에서 연구개발 진행 여부를 판단하기 위하여 핵심요소기술(Critical Technology Element)의 기술 성숙도 지표를 판단하여 평가하는 기술 성숙도 평가(Technology Readiness Assessment) 방안이다. 1980년대 미 항공우주국(NASA)에서 우주 개발 사업의 기술적 위험을 관리하기 위하여 제안되었으며, 무기체계 연구개발에 적용은 1999년 미국 국방성에서 연구개발의 선행연구부터 전력화 단계까지 총 9 단계로 기술 성숙도를 평가하면서 시작되었다. 국내에서는 2012년 방위사업청에서 기술성숙도 평가지침을 제정하면서 도입되었다. 민간분야에서도 유사 개념으로 개발 단계에서의 수준을 평가하고 있다.

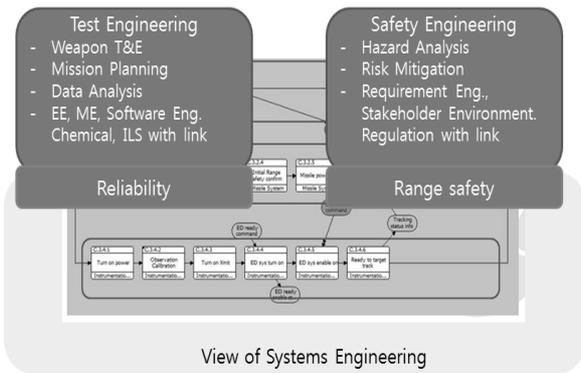
대형화되고 복잡해지는 무기체계는 통합 전장 개념 도입과 상호 운용성의 증가로 인하여 핵심기술요소(CTE) 지표의 식별에 따른 TRA로는 연구개발 수명주기의 단계 전환을 평가하기에는 어려우며, 소프트웨어 기반 무기체계의 대두는 기존 TRL 방식의 문제점으로 제시되고 있다. 복잡한 시스템의 경우 핵심기술소요의 기술 성숙도는 높지만 시스템의 완성도가 떨어지거나, 고려하지 못한 상황으로 인하여 적기에 사업이 종료하지 못하거나, 성능이 기준을 충족하지 못하여 사업을 재검토하는 등 사례가 발생하였는데, 성숙도가 높은 핵심기술간의 통합 정도가 낮음에 따라서 발생한 문제로 접근하여 이를 해결하기 위하여 기술성숙도(TRL)와 함께 통합성숙도(Integration Readiness Level)라는 지표를 결합하여 시스템 성숙도 평가(System Readiness Assessment)로서 무기체계의 성숙도를 평가하고자 하는 시도가 Sauser를 중심으로 연구 중에 있다[11,12]. 한국에서도 시스템 공학 기반의 시스템 성숙도 모델에 대한 연구가 김중명, 권일호의 연구 결과로 제시된 바 있다[13,14]. 시스템 성숙도 평가는 정량적인 성숙도 평가 방식으로 정성적인 평가 방식인 기술성숙도의 한계를 보완하는 방식으로 무기체계 획득을 위한 결심과 비용 추정을 위한 대안 및 다양한 연구 방안으로서 연구 중에 있다. 시스템 성숙도 평가 개념은 복잡한 시스템에 새로운 부 체계를 추가하거나 부분적인 성능 보강을 검토할 때도 통합 정도를 고려하므로 복잡한 시스템의 성숙도를 평가하는데 유용하게 사용될 수 있다.

### 2.4 무기체계 시험 수행의 안전

무기체계의 성능 검증을 위하여 수행하는 실사격 시

험은 발사, 분리, 폭발, 타격, 낙하 등 화학적, 물리적 현상을 발생시키는 안전 위험 요소가 큰 과정이다. 시험 준비과정에서 발생할 수 있는 기계적/전기적 사고와 시험 과정에서 대상체가 통제 불능 상태가 되어 예상치 못한 지역으로의 비행하여 예상 비행구역 외에 낙하 및 폭발 등이 일어날 경우, 낙하 예상지역 인근 시설에 대한 물적 손상 뿐 아니라 인명의 치명적 손상을 야기할 수 있다. 시험 중에 발생할 수 있는 치명적인 사고를 방지하기 위하여 무기체계 시험 수행시 안전성을 강화하기 위한 다방면의 노력을 기울이고 있다. 안전 중시 시스템이란 인명손상이나 환경에 대한 치명적인 영향을 미칠 수 있는 시스템으로서 의료기기, 항공기 통제, 무기체계, 핵발전소 등의 예를 들수 있으며, 최근 광의적 범위의 안전 중시 측면에서 구급망, 수도/전기 공급망 등 인프라 구축 시설도 그 피해 정도를 고려할 때, 안전 중시 시스템으로 고려할 수 있다.

안전중시 시스템으로서 무기체계 시험수행 체계를 구성하기 위해서는 안전기능 요소가 반영되어야 하며, 검증은 위해성 분석과 안전 기능에 대한 기능 점검이 같이 수행되어야만 한다. [Figure 3]는 안전 기능을 고려한 실사격 시험 수행 아키텍처 구성 방안을 제시한 것이다.



[Figure 3] System Architect concept of weapon test and evaluation with Testing and Safety [7]

## 2.5 안전도 평가

개념 설계 단계에서 초기 안전 강화 조치나 사고 위해성 분석은 HAZOP (Hazard and Operability)을 통한 PHA(Preliminary Hazard Analysis), SSHA(Sub-System Hazard Analysis)등에서 시작하여 상세 설계시 SHA(System Hazard Analysis)와 OSHA(Operation & Support Hazard Analysis) 그리고 HHA(Health Hazard Analysis) 등을 통하여 안전 기능에 대한 세부 항목들을 식별하고 기능화 한다. 안전 기능과 신뢰성을 중심으로 IEC 61508에서 제시

하는 SIL(Safety Integrity Level)이 최근 대두되고 있는데, SIL은 전체 시스템 구조 중에 안전 모듈로 운영되는 SIS(System Instrumentation System)에 대한 신뢰성과 기능 안전 수준을 제시하고 있다.

FMEA(Failure Mode Effects and Analysis)는 설계과정에서 연계성을 검토하여 시스템의 잠재적인 고장 모드를 식별하고, 고장이 발생하였을 때, 영향을 평가하고, 위험 저감책을 제시하며, 잠재 결함에 대한 순위를 결정하므로 초기 식별이 가능하다는 이점이 있다.

[Figure 4]는 FEMA의 순서 절차를 제시한 것이다. 여기서 RPN(Risk Priority Number)는 아래 (식 1)로 얻어진다.

$$RPN = Severity \times Occurrence \times Detection \text{ (식 1)}$$

여기서 심각도(Severity)는 위험정도로 결정되며, 발생도(Occurrence)는 특정 이벤트가 발생할 가능성으로서 고장원인을 식별하여 조절함으로써 전체 개선 효과를 가져올 수 있다. 감지율(Detection)은 설계시 감지되지 않는 빈도를 의미하며, 전체 고장( $\lambda$ )에 대하여 식(2)~(5)로 정의할 수 있다.

$$\lambda_S = \lambda_{SD} + \lambda_{SU} \text{ (식 2)}$$

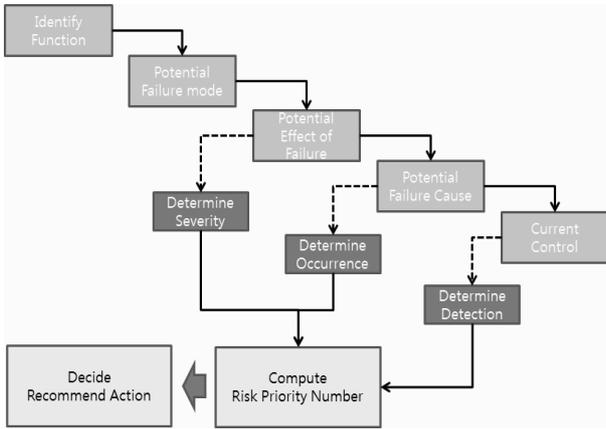
$$\lambda_D = \lambda_{DD} + \lambda_{DU} \text{ (식 3)}$$

$$\lambda = \lambda_S + \lambda_D \text{ (식 4)}$$

$$\lambda_U = \lambda_{SU} + \lambda_{DU} \text{ (식 5)}$$

여기서 안전 고장률(safety failure,  $\lambda_S$ )는 감지 안전 고장률( $\lambda_{SD}$ )과 비감지 안전 고장률( $\lambda_{SU}$ )의 합이며, 위험 고장률(dangerous failure,  $\lambda_D$ )는 감지 위험 고장률( $\lambda_{DU}$ )과 비감지 위험 고장률( $\lambda_{DD}$ )로 제시된다. SIL을 평가하는 SFF(Safety Function Fraction)은 식(6)으로 주어질 수 있다.

$$SFF = \frac{\lambda_S + \lambda_{DD}}{\lambda_S + \lambda_{DD} + \lambda_{DU}} \text{ (식 6)}$$



[Figure 4] FEMA flowchart map

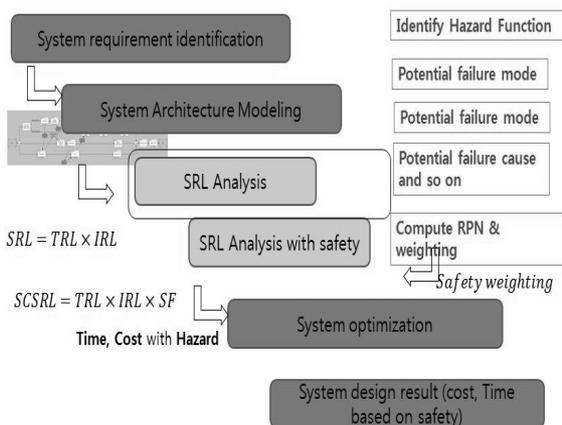
## 2.6 연구 방법

복잡한 시스템의 성숙도를 평가할 때, 인터페이스와 기능적 중요도 판단과 함께, 안전 기능을 고려하기 위하여 [Figure 5]과 같은 연구 순서를 제시하였다.

개념설계 단계에서는 시스템 성숙도 판단 모델을 위한 시험 수행체계 아키텍처를 설계 한다. 아키텍처를 설계하기 위해서는 요구조건에 따른 시험 자원을 식별하고, 식별된 시험자원과 시험운용 절차 및 시나리오에 의하여 시험 아키텍처를 구성한다.

상세 설계 단계에서는 시험 아키텍처의 기능적 모델에 대한 논리적 검증과 함께 개별 요소에 대한 기술과 통합 성숙도를 판단하기 위한 TRL과 IRL을 식별하며, 안전기능 식별 및 RPN을 도출한다.

통합 단계에서는 시스템 성숙도 모델에서 잠재적인 위험 요소를 반영한 성숙도 모델을 제시하는데, 안전가중치 모델을 별도로 구성하여 식별한다.



[Figure 5] System development assessment process with safety in live fire weapon test

## 3. 시스템 성숙도 평가

### 3.1 통합 성숙도

본 논문에서는 미국 국방성의 기술성숙도를 중심으로 설명하고자 한다. 기술성숙도 지표는 개발자와 사용자간의 의사소통 수단으로서 Mankins에 의해 9단계로 정의되었다[6]. <Table 1>은 미 국방성의 TRL 단계를 나타낸 것이다. 현재 사용중인 TRA는 복잡한 무기체계와 소프트웨어 기반의 무기체계 시스템을 대상으로 적용하기에는 한계가 여러 문헌에서 제기되었다[11,12]. 특히 식별된 핵심기술요소간의 인터페이스의 고려 부족에 따른 전체 시스템의 기능 이상이나 복잡한 시스템 (Systems of system)의 경우, 각 시스템 간의 상호 동작에 대하여 정의가 미흡하여, 정상적 기능이 수행하지 못할 수 있으므로 각 주요 기술 요소간의 인터페이스를 식별하고, 이에 대한 성숙도를 제시하기 위하여 통합 성숙도 레벨을 정의한 바 있다[11,12,13].

OSI 7 layer 개념의 추상화를 통하여 동일하게 7단계로 구성되었던 IRL은 기존 평가기준으로 사용되는 TRL 과 연계성 등을 고려하여 총 9단계로 구성되었는데, <Table 2>는 IRL을 나타내었는데, 중심 용어는 볼드체로 표시하여 이해를 돕고자 하였다 [12].

<Table 1> Technology Readiness Level

Level	Definition
1	Basic principles observed and reported
2	Technology concept and/or application formulated
3	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept
4	component and/or breadboard validation in a laboratory environment
5	Component and/or breadboard validation in a relevant environment
6	System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment
7	System prototype demonstration in an operational environment
8	Actual system completed and qualified through test and demonstration
9	Actual system proven through successful mission operations

<Table 2> Integration Readiness Level

Level	Definition
1	An <b>Interface</b> between technologies has been identified with sufficient detail to allow characterization of the relationship
2	There is some level of specificity to characterize the <b>Interaction</b> (i.e. ability to influence) between technologies through their interface.
3	There is <b>Compatibility</b> (i.e. common language) between technologies to orderly and efficiently integrate and interact.
4	There is sufficient detail in the <b>Quality and Assurance</b> of the integration between technologies.
5	There is sufficient <b>Control</b> between technologies necessary to establish, manage, and terminate the integration.
6	The integrating technologies can <b>Accept, Translate, and Structure Information</b> for its intended application.
7	The integration of technologies has been <b>Verified and Validated</b> with sufficient detail to be actionable
8	Actual integration completed and <b>Mission Qualified</b> through test and demonstration, in the system environment.
9	Integration is <b>Mission Proven</b> through successful mission operations.

### 3.3 시스템 성숙도 지표 식별

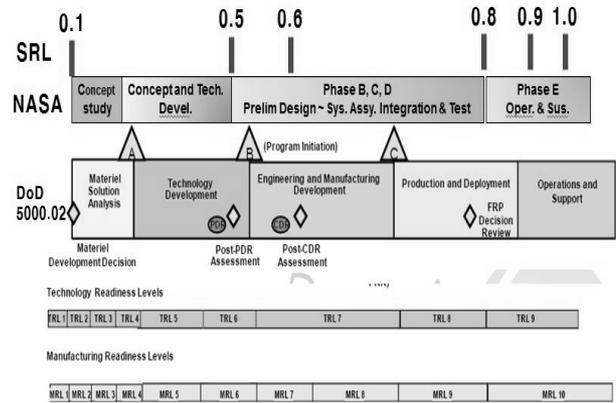
시스템 성숙도는 기술성숙도와 요소기술 간의 통합 성숙도의 합성을 통하여 정량적으로 그 수준을 제시할 수 있다. 두 판단지표를 행렬로 제시하였을 때, (식 7)~(식 10)로 표시할 수 있다. 식(7)은 개념적인 내용을 기술한 것이며, 식(8)은 정규화된 기술성숙도 ( $TRL'$ )와 통합성숙도( $IRL'$ )를 이용하여 각 요소기술에 대한 통합성숙도 갯수는  $m_n$  로 정의한다. 3개의 기술요소에 고려한다고 가정하였을 때, (식9)에서 이를 제시하였으며, 총합은 (식10)으로 제시되어 진다.

$$SRL = IRL \times TRL \quad (\text{식 } 7)$$

$$SRL = Norm \times IRL' \times TRL' \quad (\text{식 } 8)$$

$$[SRL_1 \quad SRL_2 \quad SRL_3] = \begin{bmatrix} IRL_{11} & IRL_{12} & IRL_{13} \\ IRL_{12} & IRL_{22} & IRL_{23} \\ IRL_{13} & IRL_{23} & IRL_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} TRL_1 \\ TRL_2 \\ TRL_3 \end{bmatrix} \quad (\text{식 } 9)$$

$$SRL = \frac{SRL_1}{m_1} + \frac{SRL_2}{m_2} + \dots + \frac{SRL_n}{m_n} \quad (\text{식 } 10)$$



[Figure 6] System Readiness Level and Development life cycle with TRL and MRL

[Figure 6]은 제시된 시스템 성숙도와 TRL, 제조 성숙도(Manufacturing Readiness Level)를 미국의 국방연구개발 수명주기 및 NASA와 개발수명주기와 비교한 그림이다. 그림에서 본 바와 같이 체계 개발 단계로 전환하기 위해서는 시스템 성숙도는 0.5이상을 운용 및 제조로 이어지기 위한 시스템 성숙도는 0.8을 목표로 하고 있다. <Table 3> 연구 개발 수명 주기 별 시스템 성숙도 목표를 제시한 것이다.

<Table 3> Systems Readiness Level based on DoD 6000.02

SRL	Development Phase
0.10~ 0.39	Material Solution Analysis
0.40~ 0.59	Technology Development
0.60~0.79	Engineering and Manufacturing Development
0.80~0.89	Production and Deployment
0.90 ~1.0	Operational & support

### 3.3 Safety critical System Readiness Level

기존 시스템 성숙도 평가는 정량적인 성숙도 분석이 가능하지만, 복잡한 시스템을 구성하는 요소들의 위험에 미치는 영향과 그에 따른 가중치가 부여하지 못하며, 가중치가 높은 핵심기술에 대한 전체 성숙도 영향을 고려하지 못한다는 한계를 가지고 있었다. 본 연구에서는 안전중시 시스템에서 안전을 고려하기 위하여 먼저 안전 모델링을 실시하였다. <Table 4>은 FEMA의 RPN 도표로서 세로축은 빈도(probability)를 가로축은 위험 영향 정도(harm severity)를 나타낸다.

<Table 4> Risk Hazard Matrix

	Negligible	Marginal	Critical	Catastrophic
Rare	1	1	2	3
Unlikely	1	1	2	4
Possible	2	2	3	4
Likely	3	3	3	4
Certain	3	3	4	4

(식 11)는 FEMA를 통하여 얻어진 RPN과 TLM 도출시 고려되었던 안전중요기능(Safety Critical Function) 참여수, 그리고 안전 시스템으로 동작하는 참여 요소(Safety Instrumentation System)를 변수로 전체 시스템 중 요소 간 안전 가중치를 나타낸 것으로서 식(11)의 관계는 시스템 구성에 따라서 변화할 수 있다.

$$SF_n = f(RPN, SCF_n, SIS_n) \quad (\text{식 11})$$

안전 중시 시스템으로 안전 요소를 정의하는 시스템을 m 이라고 가정하면, 전체 시스템 구성 요소수(n)은  $n \geq m$  관계를 충족하며, 기존 통합 시스템 성숙도를 (식 12)로 표시하면, 안전 요소를 고려하여 안전 중시 시스템 성숙도(Safety Critical System Readiness Level)를 (식13)으로 제시할 수 있다.

$$SRL_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SRL_i \quad (\text{식 12})$$

$$SCSRL_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n SRL_i \times Sw_i \quad (\text{식 13})$$

여기서  $Sw_i$ 는 전체 식별된 안전기능에 대하여 각 시스템의 성숙도별 가중치로서 (식 14)에서 제시되었다.

$$Sw_i = \frac{SF_i}{n} \quad (\text{식 14})$$

## 4. 시스템 구현

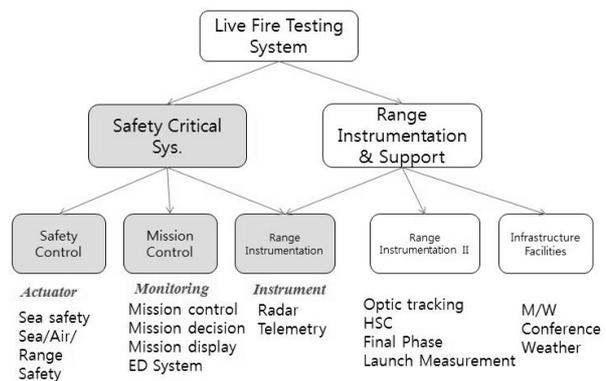
### 4.1 시험체계의 시스템 구성

무기체계 시험 수행체계에 대한 시스템 성숙도를 구하기 위하여 시험 수행을 위한 요소를 다음과 같이 네 가지 범위로 구분하였다 [7].

- 시험 대상체(Target or Missile)
- 비행 임무 통제(Mission control)
- 시험 계측(Range Instrumentation)
- 기반 시설(Instrumentation Facilities)

시험 수행체계는 안전 기능 식별을 위한 안전 중시 시스템과 계측 및 지원 요소로 구분할 수 있다. 안전 중시 시스템은 시험 진행시 위해요소를 판단하는 안전 통제(Safety control), 시험의 전체적인 수행 및 상태를 판단하는 시험통제(Mission control) 그리고 시험 안전 상태 판별 정보를 제공하는 시험 계측(Range Instrumentation)으로 구성되며, 단순 시험 계측 요소는 안전과 관련없는 성능 계측 요소와 기반 시설(Instrumentation Facilities)로 구성할 수 있다. 본 논문에서 안전 중시 시스템은 SIS를 구성하는 actuator, monitoring, instrument의 개념을 대입하여 물리적 아키텍처를 [Figure 7]에서 표시하였다.

무기체계 시험평가 수행체계의 시스템 운영 개념과 시나리오, 그리고 요구조건에 기반하여 도출된 위해요소를 정리하여 <Table 5>와 같이 중요사고 리스트(Top Level Mishap)을 구성하고, 시스템의 구성요소 식별한다. 식별된 TLM에 대하여 치명적 위험 기능(Safety Critical Function)을 식별하여 위험도를 분석한다.



[Figure 7] Test resource breakdown structure for SIS

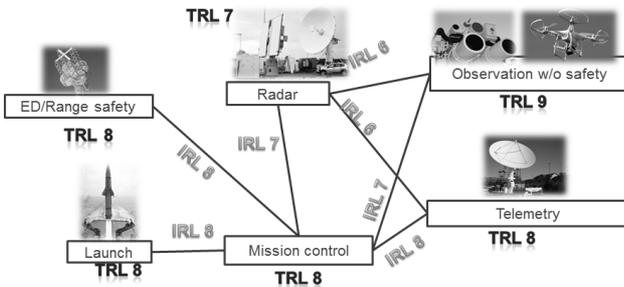
<Table 5> Relationship between TLM and Element

TLM No	Top-Level Mishap	Test Element
1	Inadvertent W/H initiation	Telemetry Optical tracking
2	Inadvertent missile launch	Telemetry Radar
3	Inadvertent missile destruct	Telemetry, Radar, ED system, Mission control
4	Incorrect target	Telemetry
5	Missile fire	Telemetry, Radar
6	Missile destruct fails	Radar,
7	Personnel injury	
8	Unknown missile state	Telemetry, Radar, Optical Tracking
9	Inadvertent explosive denotation	Telemetry

4.2 시스템 구성

시험 수행 체계는 새로이 설계 및 개발이 이루어지는 경우보다 기존 시스템의 부분적인 성능 보강이나 노후 교체 차원에서 이루어지는 경우가 많고, 연구개발에 시험 검증 목적으로 운용되는 시스템으로서 높은 성숙도와 신뢰도를 보유해야 하므로 시스템의 기술성숙도나 통합 성숙도는 전체 단계에서 높게 형성된다.

시스템 성숙도 평가를 위하여 설계된 개념 설계의 사례는 [Figure 8]에 나타내었다. 요소기술의 기술성숙도와 요소간의 통합성숙도 그리고 상관관계를 <Table 6>에 표시하였다.



[Figure 8] Test resource configuration to assessment system readiness level

<Table 6> Relationship TRL, IRL matrix

Component Technologies	TRL	Integrating Technologies	IRL
1. Mission Control	8	1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 1-6	8, 8, 7 7, 8
2. Launch	8	2-1	8
3. Range Safety	8	3-1	8
4. Radar	7	4-1, 4-5, 4-6	7, 6, 6
5. Telemetry	8	5-1, 5-4	8, 6
6. Observation	9	6-1, 6-4	7, 6

(식 12)에 따라서 제안된 시험 체계의 시스템 성숙도는 0.76을 얻게 되는데, 요소기술 또는 부-시스템의 TRL에 비하여 SRL이 낮은 것은 노후 교체되거나 새로이 추가된 시스템의 통합 성숙도가 검증되지 않음으로서 낮은 IRL에 따라서 발생한 현상이다. 요소 기술별 안전 가중치를 (식 11)로 정리하면, 아래 <Table 7>과 같이 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 모델 가중치 값을 (식 15)로 얻을 수 있다. 이에 따라서 [Figure 8]의 구조에 대해서는 안전 성숙도는 0.75로 얻어진다.

$$Safety\ Factor = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SRL_i \times 15 + SSI_i \times 12 + Risk\ M_i \times 1) \quad (식15)$$

<Table 7> Safety Weighting factor

CT	SCFs #	SSI #	Risk matrix #	Safety Weighting
1	3	5	4	0.22
2	1	1	2	0.07
3	3	5	4	0.22
4	4	5	4	0.26
5	3	4	3	0.2
6	-	1	2	0.03

SCFs는 안전중시기능의 참여 횟수, SSI는 시험 수행의 안전기능 식별 횟수, 위험 매트릭스에서 지수값 등을 인자로 사용하여 산정하였다.

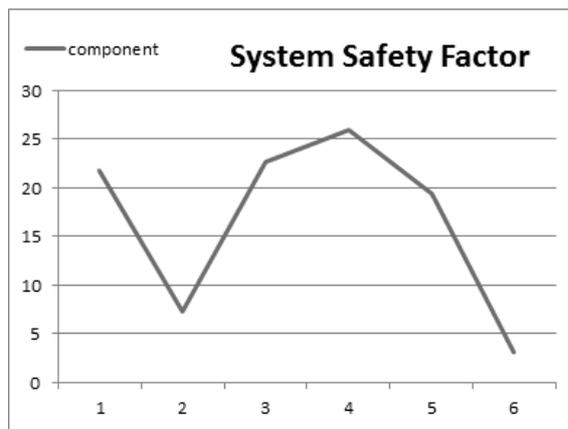
무기체계 연구개발 시험평가에 시험 시스템을 적용하기 위해서는 안정적 수준인  $SRL \geq 0.8$ 을 만족해야 하는데, TRL의 증가는 많은 자원과 노력이 요구되므로 IRL의 개선을 선행하였다. IRL이 6으로 판단된 부분을 검증을 통하여 8로 증가시켰을 때, 시스템의 성숙도는 0.81로 증가하며 이때 안전을 고려한 가중치를

고려할 때, 시스템 성숙도는 동일한 값인 0.81이 된다. 전체 가중치가 일정 정도 이상의 적절한 가중치를 가짐으로서 연구 개발 초기에서는 많이 변화할 수 있으나, 체계 개발 단계로 진입할 수준의 SRL에 대해서는 변화가 크기 않음을 알 수 있다. 가중치 값을 포함한 시스템 구성의 각종 성숙도 지표는 <Table 8>과 같이 제시될 수 있다.

<Table 8> Relationship TRL, IRL matrix with safety weighting

CT	TRL	Integrating Technologies	IRL	Safety Weighting
1	8	1-2,1-3,1-4,1-5,1-6	8,8,7,7,8	0.22
2	8	2-1	8	0.07
3	8	3-1	8	0.22
4	7	4-1,4-5,4-6	7,8,8	0.26
5	8	5-1,5-4	8,8	0.2
6	9	6-1,6-4	7,8	0.03

각각의 요소 기술의 가중치를 [Figure 9]에서는 제시한 것이다. 전체를 100으로 놓았을 경우, 가중치를 제시한 값이다.



[Figure 9] System component safety factor to assessment SRL with safety

## 5. 결론

연구개발에서 시스템의 성숙도 판단은 연구개발의 단계 전환을 위한 TRL의 제한을 보완할 수 있는 방안 중 하나이다. 복잡하고 대형화된 시스템 연구개발에서 요소 기술에 대한 성숙도 평가를 통하여 전체를 평가하기 어려운 현 시점에서 정량적으로 성숙도를 판단하는 근거를 제시하였다는 의미가 있다. 그러나 시스템

성숙도 모델을 판단하는 기술성숙도와 통합 성숙도의 판단 근거가 전문가 판단을 중심으로 얻어지고, 기술 요소의 안전이나 위험성을 식별하지 못한다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 시스템 성숙도 평가시 안전 기능 모델을 적용하여 시스템 기반의 안전도 분석을 수행하고 기능안전 요소의 시스템 영향을 분석 제시하였다. 연구에서 제시된 연구 방법은 민간에서 적용하는 IEC61508의 SIL 과 같이 안전기능별 성숙도 판단이 아닌 전체 시스템 측면에서의 중요 안전 기능 식별 및 중점 요소를 식별하여 정량적 도출 방안을 제시하였다. 본 통합 모델은 안전 기능요소 중 중요 자원의 식별을 통하여 중점 관리 항목을 선정하며, 기능별 투자 우선 순위를 결정하는데 사용할 수 있다.

향후 안전에 대한 비용적 전환과 함께 시나리오 별 위험 사항을 분석하여 안전 성능 예측 및 최적화 과정이 시스템 연구 개발 과정에 적용될 수 있도록 미래 무기체계의 실사격 시험 수행 프레임워크를 구현하고자 한다.

## 6. References

- [1] W. D Bell (2010), "Systems Engineering Test and Evaluation - The Integration Process." ITEA Journal, Vol 31:56-62
- [2] B. Simmons (2012), "T&E-The speed of need." , ITEA Journal, Vol 33:5-8
- [3] M. T. Reynolds (1996), "Test and Evaluation of complex.", Wiley
- [4] DoD (1993), "Request for coordination on revised Live Test and Evaluation (LFT&G) Guidelines. ", pp 1-10
- [5] DoD (2012), "Test and Evaluation Management Guide.", 6th Ed. pp 191-195
- [6] DAPA (2012), "Systems Engineering Guidebook.", pp 25-63, pp 191-195
- [7] S. H. Ye and J.-C. Lee (2014), "Model-Based Architecture Design of the Range safety process for live fire test with enhanced safety. " Korea Safety Management & Science, 14:43-52
- [8] D. Hinton (2014), "The DoD Test&Evaluation /Science & Technology(T&E/S&T) Program.", NDIA Annual S&E Tech., Conference

- [9] B. J. Yoo et al. (2012), "Systems Engineering based Live Fire Test of Weapon systems." KIMST, Vol 15 :28-35
- [10] C. H. Ryu et al. (2010), "A study on the CMMI Engineering process area modeling of test process." KIMST, Vol 13 (2) :235-242
- [11] R. B. Magnaye et al. (2010), "System Development Planning Using Readiness Levels in a Cost of Development Minimization Model." Systems Engineering Vol 13 (4) :311-323.
- [12] B. J. Sausser et al. (2008), "A System Approach to Expanding the Technology Readiness Level within Defense Acquisition." Int. J. of Defense Acquisition Management, Vol 1: 39-58
- [13] J. H. Kim and Y. W. Park (2010), "Development of the System Technical Maturity Assessment Model for Defense R&D Programs Decision Support.", KIMST Vol 13(5):808-817,
- [14] M.A. Lundteigen and M. Rausand (2009), "Architectural constraints in IEC 61508: Do they have the intended effect?" Reliability Engineering and System Safety, Vol 94: 520-525.
- [15] C. A. Ericson, II (2005), "Hazard Analysis Techniques for system safety," John Wiley & Sons, Inc.,
- [16] I. L. Kwon and J.-C. Lee (2013), "On an improved method system readiness assessment to meet required operational capability in weapon system development." J. of academia-industrial technology Vol. 14 (8) : 3602-3610
- [17] S. H. Ye and J.-C. Lee (2015), "On multiple ETA-based Test framework to enhanced safety maturity of live fire tests for weapon system.", Korea Safety Management & Science, Vol. 17:75-84

## 저자 소개

### 예성혁



현 국방과학연구소 책임연구원, 아주대학교 시스템공학과 박사과정. 관심분야는 시험평가 관련 시스템공학 적용 및 안전설계, 모델기반 시스템공학 등

### 이재천



현 아주대학교 시스템공학과 정교수. 서울대학교 전자공학과에서 공학사, KAIST 전기 및 전자공학과에서 공학석사 및 박사 학위를 취득. 미국 MIT에서 Post-Doc을 수행하였으며, Univ. of California (Santa Barbara)에서 초빙연구원, 캐나다 Univ. of Victoria (BC)에서 방문교수, 미국 Stanford Univ. 방문교수 역임. 현재 연구 및 교육 관심분야는 시스템공학(SE), 모델기반 시스템공학 (MBSE), 시스템 안전(Systems Safety), 시스템 시험평가(Systems T&E) 및 다양한 산업 및 공공 분야에서의 SE 응용 등.