

유도무기 시험평가 방법과 신뢰성 성장을 고려한 시험 수량 산출

이연호^{*,1)} · 김재황¹⁾ · 이계신¹⁾ · 이종신¹⁾ · 이명진¹⁾ · 김두현²⁾

¹⁾ LIG넥스원(주) ILS연구소

²⁾ 국방과학연구소 제6기술연구본부

Calculation of Sample Size for Guided Missile Considering Test Method and Reliability Growth

Youn-ho Lee^{*,1)} · Jae-hwang Kim¹⁾ · Kye-shin Lee¹⁾ · Jong-sin Lee¹⁾ ·
Myoung-jin Lee¹⁾ · Doo-hyun Kim²⁾

¹⁾ ILS R&D Lab, LIG nex1, Korea

²⁾ The 6th Research and Development Institute, Agency for Defence Development, Korea

(Received 19 May 2017 / Revised 8 August 2017 / Accepted 13 October 2017)

ABSTRACT

Since guided weapon is high-cost and one-shot device which is non-reusable, it requires a lot of resources to prove required accuracy as a part of reliability demonstration. Once a test for proving accuracy rate of guided missile fails, it causes an additional cost and delay of schedule.

This study introduces an equation for proper sample size and plan for guided-missile accuracy rate test in order to minimize the risk of test failure. Proper sample size for the test is derived by considering the reliability growth. Furthermore, each task for accuracy rate test is defined according to the development step. Therefore, this study can contribute to reduce sample size for accuracy rate test in order to meet the reliability requirement and assure transparency in the test process.

Key Words : One-shot Device(일회성 장비), Reliability Growth(신뢰성 성장), Sample Size(시험수량), Success Run(연속성공)

1. 서론

유도무기는 그 기능을 한번 사용했을 경우 재사용이 불가능한 일회성 장비(One-shot device)로 방위산업의 대표적인 고가의 복합 시스템이다. 일회성 장비는 고 신뢰도 고 품질을 요하는 제품으로, 요구되는 신뢰도가 일정수준(신뢰수준, Confidence Level) 이상으로

* Corresponding author, E-mail: younho.lee@lignex1.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

보장되어야 한다. 이러한 요구 사항은 신뢰성 입증 시험(Reliability Demonstration Test)을 통해 만족여부가 확인되며, 시험수량은 요구되는 신뢰도 및 신뢰수준에 의해 결정된다^[1].

유도무기의 신뢰도 척도인 명중률에 대한 시험은 파괴검사로 진행되어 시험을 진행하기 위해서는 비용, 일정, 인력 등 많은 자원이 소모된다. 따라서 신뢰수준을 만족하는 신뢰성 입증 시험을 위해서는 소요 자원들이 사업계획에 반영되어야 한다. 그렇지 않을 경우 사업은 큰 잠재위험을 내포하게 되고, 잠재위험이 현실화 되었을 경우에는 관리자와 개발자 그리고 소요군 모두에게 큰 손실을 끼치게 된다.

현 국내개발 유도무기의 명중률 평가는 획득 명중률(명중수/시험발수)에 기인하여 합격/불합격을 판정하고 있다. 이와 같은 평가 방법은 일부 시제품에 대한 시험결과를 전체로 확대 해석함으로써 실제 장비의 명중률에 대한 대내외적 불신을 야기하였다. 이에 따라 많은 연구에서 획득 명중률(명중수/시험발수)에 기인한 시험계획이 아닌 이항분포를 활용한 통계적 관점의 시험기준 수립 및 결과 판정을 주장하였다^[2-5]. 하지만 통계적 관점의 시험계획은 크게 2가지 제약사항으로 인해 현실적으로 적용하기 어렵다. 첫째는 시험 성공/실패 여부에 따라 요구 신뢰수준을 충족하기 위해 과도한 재시험수량이 요구되며, 둘째로 시험 성공/실패 여부를 사전에 예측하기 어려워 실패에 따른 재시험수량을 사업계획단계에서 반영하기에 제한이 있다. 즉, 대다수의 연구에서 주장하는 통계적 관점의 시험계획을 현 사업에 그대로 적용할 경우 시험기준 충족을 위해 매 실패마다 많은 수의 재시험을 수행해야 하며 이러한 재시험은 사업계획단계에서 예측/반영하기 어려운 사업의 큰 위험요소 중 하나가 된다.

따라서 본 논문에서는 통계적 관점의 시험기준을 현실적으로 적용하기 위한 명중률 평가/검증 방안을 논의하며 이를 사업계획단계에서 예측/반영하기 위한 재시험 수량 산출 모델과 업무절차를 제시한다.

논문 구성은 먼저 2장에서 개발단계에서 수행되는 설계개선활동을 반영한 명중률 평가/검증 방안을 제시한다. 3장에서는 2장에서 제시한 평가/검증 방안을 기준으로 통계적 관점의 최소 시험수량을 산출하고 설계개선활동을 통한 신뢰도 성장을 고려하여 재시험 수량 산출 모델 및 재시험 수량을 제시한다. 4장에서는 재시험수량을 포함 적정 시험수량을 사업계획에 반영하기 위한 명중률 구현 업무 절차를 정리하며, 5

장에서는 수치예제를 통해 본 논문에서 제시하는 수량산정 방안의 적절성에 대해 논의한다.

2. 개발단계 명중률 평가/검증 방안

2.1 현 국내개발 유도무기 명중률 평가 절차

현 유도무기 개발단계에서 수행되는 명중률 평가/검증은 사격시험을 통해 성공횟수에 따른 명중비율을 계산하여 목표 명중률 만족여부를 판단하는 방법으로 수행되며 일반적인 고려사항은 다음과 같다^[6].

- 유도무기의 목표 신뢰도는 유도무기의 명중률이다.
- 유도무기는 유도탄이 발사대를 이탈하여 표적에 명중하면 성공으로 한다.
- 유도탄 사격은 1발 단위로 순차적으로 수행되며, 사격 결과는 각각 독립적이다.
- 시험과정은 모니터링 되고, 실패 시 원인은 분석되어 개선사항이 다음 유도탄에 적용된다.

상기 고려사항을 정리하면 유도무기 명중률 평가는 매 사격 간 표적 명중여부를 확인하여 시험 결과를 “성공” 또는 “실패”로 판정하고, 사격 결과 미성공인 경우 원인분석 및 결함식별을 통해 이후 유도무기들에 수정사항을 반영하는 TAAF(Test, Analyze and Fix) 과정으로 진행된다.

2.2 유도무기 명중률 평가 문제점 및 방안

연구개발 단계에서의 유도무기 평가는 개발이 완료된 양산품 중에서 일부를 추출하여 시험하는 것이 아니라 개발 프로세스를 거치면서 신뢰성이 향상되는 과정에 있는 시제품으로 사격시험을 수행한다^[6]. Fig. 1과 같이 시험을 거치면서 설계가 개선된 유도무기는 이전 시험의 장비와 완전히 동일한 품목이 아니며 설계 일부가 개선된 다음 버전의 장비가 된다^[7].

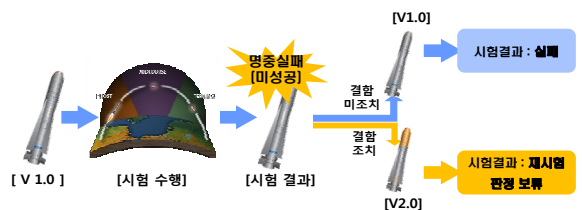


Fig. 1. Procedure of result-judgement for non-guided missile in test

이와 같은 상황에서 사격 간 유도무기가 표적에 명중하지 못한 경우 “실패”라고 판정하는 현 명중률 평가 방법은 설계개선활동을 고려하지 않은 것이다. “실패” 판정은 표적 명중실패(미성공)를 야기한 잠재결함이 제거 또는 해소되지 않고 매 시험 발생할 수 있으며 향후 양산 전력화 장비에도 동일하게 존재한다는 의미이다. 하지만 앞선 고려사항에서는 미성공 시 원인분석 및 설계개선이 수반되어 이후 제작/개발되는 유도무기에 반영된다고 하였으며 연구개발 프로세스상 이러한 설계개선활동이 관리자, 개발자, 소요군에 의해 수행된다는 점을 고려하면 “실패” 판정은 현실과 모순되는 부적절한 판정이다.

본 논문에서는 개발단계에서 수행되는 일련의 TAAF 과정을 고려하여 사격 결과 미성공에 대해 해석을 “실패” 판정이 아닌 설계개선을 통한 재시험을 수행해야 하는 판정보류로 해석한다⁸⁾.

즉, 앞선 고려사항과 같이 사격 결과 미성공 시 명확한 원인분석과 설계개선이 수행이 된다면 개발단계 유도무기 명중률 평가에 “실패” 판정 없이 성공 또는 보류의 의사결정만 존재하며, 시험합격의 기준은 성공과 실패횟수가 아닌 성공횟수만 고려하게 된다. 여기서 중요한 전제조건은 TAAF를 통한 설계활동은 반드시 설계개선으로 이어진다는 점이다⁹⁾.

제시한 평가방식을 적용할 경우 통계적 시험기준을 반영하더라도 성공횟수는 변하지 않는 고정값이 되고, 관리자, 개발자 및 소요군이 관리해야할 위험요소는 재시험수량에 한정할 수 있다. 기존 평가방식인 성공/실패판정에²⁾ 통계적 시험기준을 반영할 경우 실패수량 증가에 따른 성공횟수 증가로 통계적 시험기준을 수용하기 어렵게 된다. Table 1은 목표명중률 80%, 요구 신뢰수준 80%인 시험기준에 대해 미성공에 대한 기존 평가방식(성공/실패판정)과 제시안(성공/보류판정) 적용에 따른 시험수량을 비교하였다. 총 수량 및 성공수량은 미성공 횟수에 따른 시험합격을 위한 최소수량이며, 추가 수량은 모든 시험에서 성공한 경우(미성공 0)보다 평가를 위해 추가로 요구되는 수량을 나타낸다.

성공/실패 판정을 고려한 기존 평가 방식은 미성공 횟수 당 재시험수량이 최소 5발에서 최대 8발인 것을 알 수 있다. 이는 “실패” 판정으로 인해 하락된 신뢰수준을 요구 신뢰수준 이상으로 회복하기 위해 요구 성공수량이 증가하기 때문이다. 하지만 성공/보류 판정을 고려한 평가 방안에서는 미성공 횟수만큼 추가

시험을 진행하면 되므로 매 시점 결과에 따른 재시험 수량은 1발로 한정된다.

Table 1. Sample size for test-success by the number of none-hit(Target accuracy 80 %, confidence level 80 %)

미성공 횟수	Sample Size for test-success			
	미성공=실패 (총수량/성공)	추가 수량	미성공=보류 (총수량/성공)	추가 수량
0	8 / 8	-	8 / 8	-
1	16 / 15	8	9 / 8	1
2	21 / 19	13	10 / 8	2
3	28 / 25	20	11 / 8	3
4	34 / 30	26	12 / 8	4

본 논문에서 제시하는 명중률 평가 방안을 적용할 경우 기존 평가 방식에 비해 재시험에 대한 불확실성을 최소화할 수 있으며 다음 장에서 제시될 신뢰도 성장을 고려한 재시험수량 예측모델을 통해 사업초기부터 재시험에 대한 위험요소를 관리할 있다.

3. 재시험을 고려한 시험수량 산정

3.1 가정사항

- 결함은 체계 고장을 유발하는 결함과, 체계 고장을 유발하지 않는 결함으로 분류된다.
- 체계 고장을 유발하는 결함은 식별가능하며 식별된 결함은 이후 시험 시제들에서 완전 제거된다.
- 단일 결함은 체계 기능에 독립적으로 영향을 미치며, 해당 결함으로 인해 나타날 수 있는 복합고장 및 결함은 고려하지 않는다.
- 체계 고장을 유발하지 않는 결함은 이후 시험 시제들에 잔존해 있으며 해당 결함들은 실제로 장기적으로 장비의 신뢰성을 저하시킬 수 있지만 이와 같은 현상은 무시한다.

3.2 최소 시험수량 산출(시험수량 하한 설정)

유도무기 시험은 결과가 성공/실패 또는 정상/불량과 같이 베르누이 시행으로 진행되므로 이항분포를 이용하여 시험 결과(n 개 중 r 개 실패 또는 성공)에 대해

입증하고자 하는 신뢰도(명중률)에 대한 신뢰수준을 계산할 수 있으며 관련 식은 식 (1)과 같다^[1,10,11].

$$\sum_{i=0}^r \binom{n}{i} (1-R_L)^i R_L^{n-i} = 1 - CL \quad (1)$$

- n : 시험발수
- r : 실패발수
- CL : 신뢰수준
- R_L : 요구(목표) 신뢰도

앞선 2장에서 언급한 성공/보류 판정 평가 방안을 반영할 경우, 명중률 평가/검증은 실패 없이 연속성공 (Success Run) 시험으로 진행된다. 따라서 성공/보류 판정 평가 방안의 시험기준은 성공횟수이며 이는 시험합격을 위한 최소 시험수량 n 이 된다^[8]. 최소 시험수량 n 은 상기 이항분포식에 실패발수를 0으로 가정하여 식 (2)와 같이 산출할 수 있으며 여기서 산출된 최소 시험수량 n 은 미성공 및 재시험 횟수와 무관한 상수값으로 시험합격의 기준이 된다.

$$n = \left\lceil \frac{\ln(1-CL)}{\ln(R)} \right\rceil \quad (2)$$

3.3 재시험을 고려한 총 시험 수량 예측

통계적 관점의 시험기준인 목표 명중률에 대해 요구 신뢰수준 이상을 만족하기 위해서는 명중률 시험에서 최소 n 번 이상 성공해야 한다. 하지만 n 번의 시험 간 장비의 잠재결함으로 미성공이 발생할 수 있으며 결함발생, 즉 미성공 횟수만큼 n 번의 시험 이후의 재시험에서 성공해야만 시험기준을 충족할 수 있다. 따라서 본 장에서는 결함발생확률과 설계개선을 통한 신뢰도 성장 개념을 고려하여 재시험을 포함한 총 시험 수량 산출 모델을 제시한다. 수식모델은 먼저 n 번의 시험간 결함(재시험) 발생 횟수를 예측하고 n 번 이후 재시험에서 예상 성공수가 결함 수 이상이 되는 최소 N 을 산출한다. 여기서 결함발생확률은 Donald. P. G. 외^[12]에서 제시한 포아송 분포를 활용한 수식모델을 적용한다.

3.3.1 n 번 시험수행 간 예상 결함 수

최초 장비의 잠재 결함수가 D_0 라고 가정한다. 이때

각각의 결함들은 독립적으로 명중률 시험결과에 영향을 미치며, 결함으로 인해 시험결과 미성공일 확률을 p , 영향을 미치지 않을 확률이 $(1-p)$ 이고 총 시험수량을 N 이라 하면, 잠재 결함이 D_0 일 때 예상 성공수량 S_0 는 성공확률이 $(1-p)^{D_0}$ 인 이항분포이므로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[S_0|D_0] = N \cdot (1-p)^{D_0} \quad (3)$$

여기서 앞선 가정사항과 같이 매 시험 간 장비 고장을 유발한 결함을 식별하고, 식별된 결함들을 모두 제거하여 이후 시험의 사용될 시체에 적용되었다면 신뢰도 성장 개념을 적용하여 시험이 진행됨에 따라 잠재결함이 제거되어 성공확률은 점차 증가하게 된다. 따라서 t 번의 시험 후 장비에 남아있는 잠재 결함수가 D_t 라고 하면 남은 시험시체에 대한 예상 성공수량은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E[S_t|D_t] = (N-t) \cdot (1-p)^{D_t} \quad (4)$$

앞서 각각의 결함이 시험 성공여부에 영향을 미칠 확률이 p 라고 하였으며, 확률 p 로 미성공시 해당 결함은 식별되어 제거된다고 언급하였다. 이는 매 시험 간 각 결함은 p 의 확률로 제거되며 반대로 $(1-p)$ 의 확률로 잔존한다는 것을 의미하며, t 번의 시험 이후 결함 중 어느 하나라도 잔존해 있을 확률은 $(1-p)^t$ 가 된다.

여기서 총 잠재 결함수 D_0 는 명확히 알기 어려우므로써 상수가 아닌 확률분포 함수로 가정하며, 단위 시간 당 결함 또는 불량수에 대한 문제는 전형적인 포아송 분포의 응용 예이므로 확률분포 함수는 포아송 분포를 따른다고 가정한다. D_0 가 평균이 λ 인 포아송 분포를 따를 경우, D_t 는 평균이 $\lambda(1-p)^t$ 인 포아송 분포를 따르며 식 (4)에서 성공확률 $(1-p)^{D_t}$ 의 평균은 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} E[(1-p)^{D_t}] &= \sum_{D_t} (1-p)^{D_t} \cdot f(D_t) \\ &= \sum_{D_t} (1-p)^{D_t} \cdot \frac{[\lambda(1-p)^t]^{D_t}}{D_t!} \cdot e^{-\lambda(1-p)^t} \\ &= e^{-\lambda(1-p)^t} \cdot e^{\lambda(1-p)^t(1-p)} \\ &= e^{-\lambda p(1-p)^t} \end{aligned} \quad (5)$$

상기 식(5)를 t 번 시험 이후의 성공확률 R_t 라고 하면, 미성공 확률, 결함발생 확률은 $1 - R_t$ 이 된다. 또한, 매 시험 1발씩 시험을 진행할 경우 각 시험에서의 결함발생 확률 $1 - R_t$ 이 예상 결함수량이 되며, 최초 시험부터 최소 성공횟수인 \underline{n} 번까지의 예상 결함발생 수 $E[F_1^{\underline{n}}]$ 는 매 시험에서의 결함발생 확률의 합으로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(F_1^{\underline{n}}) = \sum_{i=0}^{\underline{n}-1} (1 - R_i) = \underline{n} - \sum_{i=0}^{\underline{n}-1} e^{-\lambda p(1-p)^i} \tag{6}$$

3.3.2 $\underline{n}+1$ 부터 N 까지 시험 간 예상 성공 수

최소 성공횟수인 \underline{n} 번 시험 이후 총 시험수량 N 까지 시험을 지속할 경우 예상 성공수량은 식 (4)와 (5)를 활용하여 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[S_{\underline{n}}^M] = (N - \underline{n})e^{-\lambda p(1-p)^{\underline{n}}} \tag{7}$$

3.4 총 시험수량

$\underline{n}+1 \sim N$ 번까지의 예상 성공수량은 기 수행한 \underline{n} 번의 시험결과와 총 시험수량(N)에 의해 결정되며, 앞서 언급한 바와 같이 최종 시험결과는 요구 성공횟수 이상의 성공이 수행되어야 하므로 기 수행된 시험에서의 성공횟수와 예상 성공횟수의 합이 요구 성공횟수가 되는 총 시험수량을 산출한다.

식 (6)과 (7)을 활용하여 예상 성공수량이 예상 결함 발생 수량이상이 되는 총 시험수량 N 의 최소값을 산출한다.

$$E(F_1^{\underline{n}}) \leq E(S_{\underline{n}}^M) \leq (N - \underline{n})e^{-\lambda p(1-p)^{\underline{n}}} \tag{8}$$

$$\underline{n} - \sum_{i=0}^{\underline{n}-1} e^{-\lambda p(1-p)^i} \leq (N - \underline{n})e^{-\lambda p(1-p)^{\underline{n}}}$$

$$\underline{n} + \frac{\underline{n}}{e^{-\lambda p(1-p)^{\underline{n}}}} - \frac{\sum_{i=0}^{\underline{n}-1} e^{-\lambda p(1-p)^i}}{e^{-\lambda p(1-p)^{\underline{n}}}} \leq N$$

$$\therefore N = \left\lceil \underline{n} + \frac{\underline{n}}{e^{-\lambda p(1-p)^{\underline{n}}}} - \frac{\sum_{i=0}^{\underline{n}-1} e^{-\lambda p(1-p)^i}}{e^{-\lambda p(1-p)^{\underline{n}}}} \right\rceil$$

산출된 총 시험수량 N 은 사업계획단계에서 명증률 평가/검증을 위해 고려해야할 시험 수량으로, 여기서 p 는 시험 미성공 확률이므로 $1-p$ 를 목표 명증률 (R_L)로 간주하여 상기 식에 적용할 수 있다. 다음 장에서는 재시험을 고려한 총 시험수량이 개발단계의 명증률 평가/검증에 충분히 반영될 수 있도록 사업계획단계에서 수행해야 할 업무를 제시한다.

4. 명증률 평가/검증 계획 수립

앞선 서론에서 언급된 바와 같이 명증률 평가/검증의 명확한 시험기준을 수립하였더라도 이를 수행하기 위한 자원이 사업계획에 반영되지 않으면, 명확한 기준은 사업진행 및 전력화의 장애물이 될 수 있다. 따라서, 본 장에서는 명확한 시험기준을 사업계획에 반영하기 위한 명증률 구현절차에 대해 논의한다.

4.1 현 실태

방위력개선사업 추진 훈령 및 규정에 따르면 유도무기 명증률 평가/검증 방안은 선행연구 및 사업추진 기본전략 수립단계에서 작성/수립되며 내용은 Table 2와 같다. 현행 훈령 및 규정에 따르면 유도무기 평가 계획 수립 시 통계적 관점의 관련사항(신뢰수준)을 고려하도록 명시하고 있다^[13,14].

하지만 현실에서는 신뢰수준을 고려한 시험계획이 아닌 가용재원을 고려한 시험기준 및 계획을 수립하고 있으며, 이는 명증률 평가의 결과 및 합격 여부가 획득 명증률에 기인하는 원인이 된다. 획득 명증률에 따른 결과관정은 샘플링 검사가 가지는 오류를 의도적으로 누락함으로써 명증률 평가/검증에 대한 불신, 나아가 유도무기 명증률에 대한 불신으로 이어지고 있다.

4.2 명증률 평가/검증 계획 수립 방안

체계적이고 현실적인 명증률 구현을 위해 다음 고려사항에 대한 검토가 필요하다.

- 평가 결과에 대한 신뢰성 있는 해석을 위해 통계적 관점의 시험계획 및 기준 수립
- 사업초기에 개발단계 평가간 예상되는 위험요소(재시험) 식별
- 평가결과는 획득 명증률이 아닌 요구 명증률에 대한 신뢰수준으로 판정

Table 2. Regulation by procedure-step for development about missile evaluation

<p>【국방전력발전업무 훈령】</p> <p>• 제44조(사업추진방법 결정 등)</p> <p>④-4.시험평가 전략 : 시험평가 방법(적정 시제수량, 유도무기의 경우 시험평가 수량 등 확보 계획 포함), 시험평가팀 구성방안</p> <p>【방위사업청 훈령(방위사업관리규정)】</p> <p>• 제65조(예산편성 절차)</p> <p>④사업관리본부장은~시험평가에 대한 예산편성 요구자료와 ~ 예산요구서안을 작성.</p> <p>• 제83조(선행연구계획서 작성 등)</p> <p>①-10.시험평가 수행방법(적정 시제수량 ; 유도무기의 경우 시험평가 수량 등 확보계획 포함)</p> <p>⑤제1항 제10호의 유도무기 운용시험평가 수량은 아래의 기준을 고려하여 산정한다.</p> <p>1. 명중률 충족여부 산술적 계산 가능 수량 2. 명중률 평가결과에 대한 신뢰수준 3. 소요예산, 기간 및 유도탄의 특성 등</p> <p>• 제88조(사업추진기본전략의 수립)</p> <p>①-9.시험평가 방법(적정 시제수량, 유도무기의 경우 시험평가 수량 등 확보계획 포함), 시험평가 수행기관, 국내 시험시설, 장비, 능력 확보 등 시험평가 전략에 관한 사항</p>
--

먼저 현행 훈령 및 규정에 의거하여 명중률 평가결과 판정을 위한 신뢰수준을 반드시 설정/제시하도록 한다. 산출된 시험수량이 신뢰수준을 고려하지 않았다면, 도출된 명중률이 객관적인 신뢰도를 보장하지 못하기 때문이다^{2,3,5,7}. 훈령에 따른 상세 업무는 Table 3 과 같다.

신뢰수준은 개발 유도무기에 대한 개발 주관기관의 개발 능력과 생산업체 개발 경험, 유도무기 특성 및 전문가 의견을 종합하여 구체적으로 설정한다. 이후 평가 방법 구체화시 재시험을 고려한 적정 시험수량을 산출하며 그에 따른 비용과 일정을 사업추진기본전략에 반영한다.

개발단계에서는 명중률 평가방식을 성공/보류로 진행하며 결과를 획득 명중률이 아닌 요구 명중률에 대한 신뢰수준으로 판정한다. 이러한 명중률 평가/검증 절차를 간략하게 도식화 하면 Fig. 2와 같다.

Table 3. Detailed task by regulation

Task
<p>【관련 훈령】</p> <p>1. 시험평가 전략 결정 2. 예산편성 요구 자료 작성 및 검토 3. 유도무기 운용시험평가 수량 산정</p> <p>【수행 업무】</p> <p>1. 명중률 산출조건, 기술수준, 평가조건 등을 검토하여 평가 방법 구체화</p> <ul style="list-style-type: none"> - 목표 명중률에 대한 개발능력, 생산업체 개발 경험, 유도무기 특성, 전문가 의견 및 유사장비 시험(운용) 결과 등을 고려하여 신뢰수준 선정 - 재시험 수량을 고려하여 시험방안 및 구체화된 작전운용능력 충족을 위한 시험수량 산출 <p>2. 재평가용성 확인 및 비용/일정 추정 결과 제시</p> <ul style="list-style-type: none"> - 작전운용성과 요구 신뢰수준을 활용하여 평가/검증을 위한 수량 분석 및 비용/일정추정 결과 제시(재시험 수량 고려) - 재시험 수량을 고려한 시험기준을 적용하여 비용 및 일정을 ‘사업추진기본전략’에 반영

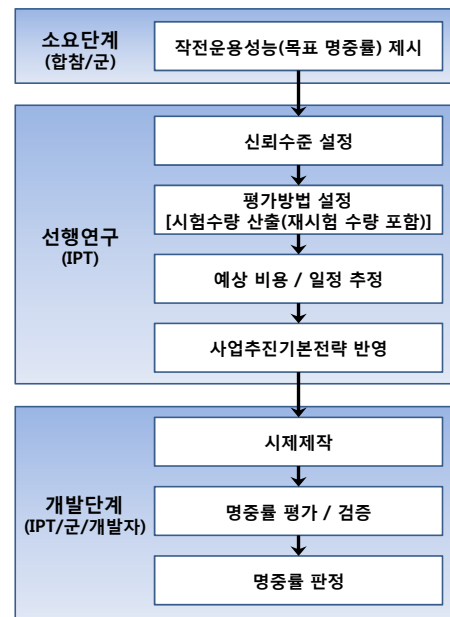


Fig. 2. Task flow by procedure-step

5. 수치예제

수치예제는 통계적 관점의 시험계획 적용에 따른 기존 평가방식과 제안 평가방식을 비교분석한다. 기존 평가방식인 성공/실패 판정에 대한 시험수량은 이항분포를 활용하여 산출하며, 제안 평가방식은 성공/보류 판정을 고려한 제안 수식모형을 적용하여 시험수량을 산출하였다. 추가로 제안 모델의 파라메타별 입력값에 따른 결과를 분석하여 제안모델의 활용성에 대해 분석한다.

5.1 수식모형 비교

제안모델의 비교대상인 이항분포는 시험결과가 이산 데이터로 나타나는 일회성 장비의 성공(실패) 확률을 산출하는데 널리 활용되는 기본적인 수식모형이다.

비교분석을 위해 수식에 적용할 파라메타는 신뢰수준(CL), 목표 명중률(R_L) 그리고 평균결함발생 수(λ)이며 각 파라메타에 대한 설명은 Table 4와 같다.

Table 4. Explanation of parameter for calculating test quantity

기호	파라메타	설명
R_L	목표 명중률	• 유도무기 작전운용성능으로 사업 초기 결정
CL	신뢰수준	• 통계적 관점의 시험계획 수립시 시험기준의 한 항목으로 전체 유도무기의 명중률이 목표 명중률 이상임을 보장하는 확률
λ	평균 결함발생 수	• 매 명중률 평가(시험)간 평균적으로 발생하는 임무수행 불가를 야기하는 잠재결함(치명) 수

두 수식모형에 대해 명중률 및 신뢰수준 변화에 따른 시험수량 변화를 확인한다. 신뢰수준(CL)은 무기체계 시험평가 실무지침에서 언급된 60% ~ 90% 구간에 대해 적용하며, 목표 명중률(R_L)은 대부분의 유도무기 사업에서 적용되는 구간인 70% ~ 90%에 대해 총 시험수량과 시험합격을 위한 성공수량을 비교분석한다.

Table 5와 Table 6에서 기존 평가방식과 제안하는 평

가방식에 따른 시험기준(목표 명중률, 신뢰수준)별 시험수량 및 성공수량을 확인할 수 있으며 성공/실패 평가방식은 왼쪽부터 실패 횟수 0, 1, 2에 따른 총 시험수량과 요구 성공수량을 나타낸다. 성공/실패 평가방식은 실패 수 증가에 따라 실패 횟수보다 더 많은 수량의 성공이 요구되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 실패가 반복될수록 요구 명중률과 신뢰수준을 만족하기 위한 성공수량까지도 증가하기 때문에 총 시험수량 역시 늘어나게 되고, 이 점은 사업의 지속여부를 고민하게 하는 문제가 된다.

그에 반해 제안 평가방식의 경우 실패를 고려하지 않기 때문에 요구 성공수량은 고정값이며 요구 성공수량 이상의 시험수량을 산정함으로써 재시험에 따른 사업적 위험을 완화할 수 있게 된다.

Table 5. Required sample-size by confidence level ($R_L = 0.8, \lambda = 5$)

신뢰수준 (CL)	성공/실패(이항분포) [시험수량/성공수량]			성공/보류 (제안모델) [시험수량/성공수량]
	실패=0	실패=1	실패=2	
60 %	5 / 5	10 / 9	16 / 14	9 / 5
70 %	6 / 6	12 / 11	18 / 16	10 / 6
80 %	8 / 8	16 / 15	21 / 19	12 / 8
90 %	11 / 11	19 / 18	27 / 25	16 / 11

Table 6. Required sample-size by target accuracy (CL = 0.8, $\lambda = 5$)

명중률 (R_L)	성공/실패(이항분포) [시험수량/성공수량]			성공/보류 (제안모델) [시험수량/성공수량]
	실패=0	실패=1	실패=2	
70 %	5 / 5	9 / 8	14 / 12	9 / 5
75 %	6 / 6	11 / 10	16 / 14	10 / 6
80 %	8 / 8	16 / 15	21 / 19	12 / 8
85 %	10 / 10	20 / 19	29 / 27	14 / 10
90 %	16 / 16	29 / 28	42 / 40	20 / 16

Table 7. Required sample-size by an average number of failure($R_L = 0.8, CL = 0.8$)

평균 결함발생수 (λ)	제안 모델		
	요구 성공수량	재시험 수량	총 시험수량
2	8	2 [1.570]	10
3	8	3 [2.296]	11
4	8	3 [2.989]	11
5	8	4 [3.656]	12
6	8	5 [4.301]	13
7	8	5 [4.928]	13
8	8	6 [5.541]	14
9	8	7 [6.143]	15

Table 7에서는 재시험 수량을 결정하는 변수인 평균 결함발생 수(λ)에 따른 시험수량을 분석하였다. λ 는 전문가 의견 또는 유사장비의 시험데이터를 통해 확보할 수 있다. 일반적으로 유도무기 시험결과 미성공은 동시다발적으로 발생하는 서로 다른 치명결함에 의한 것이 아니라 주요 치명결함 1~2건에 의해 발생한다. 따라서 λ 값은 1자리 수 이내로 가정할 수 있으며 그에 따른 재시험 수량은 성공/실패 평가방식에서 실패에 따른 추가 수량에 비해 현저히 작은 수량임을 알 수 있다.

김두현[6]에 따르면 연구개발 또는 진행중인 유도무기 목표 명중률은 평균 약 80 % 수준이며, 시험평가 수량데이터는 개발 및 운용시험평가 전체적으로 평균 13.6발, 전투용 적합관정을 위한 운용시험평가 평균 수량은 7.2발이다. 목표 명중률 80 %에 대한 제안 모델 시험수량인 Table 5을 보면 신뢰수준 전체에 대한 평균은 11.75발이며 여기서 현실적으로 적용하기 어려운 신뢰수준 90 %를 제외하면 평균 10.3발이다. 이는 현 유도무기 사업들에 반영된 개발 및 운용시험평가 전체 수량 13.6발을 조정하거나 1~2발을 추가함으로써 현 사업들에 적용가능하며 가용재원에 제한이 있을 경우 재시험 수량을 조정함으로써 충분히 수용 가능한 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 개발단계 간 통계적 관점의 명중률 평가/검증 계획수립 및 수행을 현실화하기 위한 평가방안과 재시험을 고려한 총 시험수량 산정모델을 제시하고, 이를 사업초기에 반영하기 위한 업무절차에 대해 논의하였다.

먼저 명중률 평가방식을 성공/실패가 아닌 성공/보류 판정으로 제시하였다. 제시 방안은 현 개발단계에서 수행되는 TAAF 과정을 반영한 것으로 설계개선된 장비는 미성공을 유발한 결함이 완전히 제거되므로 “실패”라고 판정할 원인이 존재하지 않게 된다. 제시 방안을 적용함으로써 통계적 관점을 고려한 시험수량 산출시 실패에 따른 수량을 산출할 필요가 없으며 현실적인 시험수량으로 통계적 관점의 시험계획을 반영할 수 있게 된다. 다음으로 장비의 결함발생확률을 활용하여 예상되는 재시험 횟수와 재시험간 예상 성공 횟수를 비교하여 시험수량을 산출하는 수식모델을 제시하였다. 제안 수식모델을 활용함으로써 재시험 수량을 사업계획단계에서 예측/반영할 수 있으며 개발단계에서 진행되는 명중률 평가간 재시험으로 인한 사업적 위험을 완화할 수 있도록 하였다. 마지막으로 앞서 제안한 평가방식과 수식모델을 반영한 사업계획 단계 업무절차를 논의함으로써 현행 훈련 및 규정에 명시된 통계적 관점의 시험계획이 현실적으로 적용할 수 있도록 하였다.

본 논문에서 제안하는 평가방식과 수식모델을 활용한 비교분석 결과를 보면 기존 평가방식의 실패에 따른 비현실적 추가/성공수량에 비해 제안 모델에서는 현실적으로 수용 가능한 시험수량이 산출됨을 알 수 있다. 더불어 현재 개발/평가중인 유도무기 사업들에 반영된 시험수량과 큰 차이가 없는 것을 확인 할 수 있다. 이를 바탕으로 통계적 관점의 명중률 시험계획을 수립할 수 있을 것으로 판단된다. 명중률 평가 결과를 목표 명중률에 대한 신뢰수준으로 판정하면 기존 획득 명중률로 판정함으로써 발생했던 명중률에 대한 오해와 오류를 해소할 수 있을 것이다.

마지막으로 재시험 수량을 평가를 진행하는 과정에서 산출하는 것이 아니라 사업초기단계에서 예측하여 적절한 자원을 할당할 수 있게 함으로써 평가간 불확실하게 발생하는 미성공에 대한 사업적 위험을 완화함과 동시에 관리자, 개발자 및 소요군 모두에게 신뢰성 있는 평가/검증을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Dimitri, B. K., "Reliability and Life Testing Handbook," Prentice-Hall, Inc, Vol. 2, 1993.
- [2] S. H. Hwang, "A Study on a Methodology to Decide the Adequate Number of Samples and Verify an Accuracy Rate of PGMs in T&E," Korea National Defence University, 2014.
- [3] G. H. Lee. etc, "Validation of PGM Accuracy Measures Feasibility Study and Alternative Analysis," 2014 Seminar for Test and Evaluation of Weapon System, 2014. 6. 19.
- [4] Y. H. Lee, K. S. Lee, H. J. Lee, S. M. Kim, and K. S. Moon, "A Study of Economical Sample Size for Reliability Test of One-Shot Device with Bayesian Techniques," Journal of Applied Reliability 14(3), pp. 162-168, 2014. 9.
- [5] D. H. Kim, S. H. Kim, "A Study on the Comparison of Test & Evaluation Method for the Guided Missile," Korea Association of Defence Industry Studies, Vol. 22, March 2015.
- [6] D. H. Kim, "A Study on the Test and Evaluation of the Guided Missile Based on Reliability Growth," Korea Association of Defence Industry Studies, Vol. 21, No. 3, September 2014.
- [7] Y. H. Lee and J. H. Kim, "Method of Development Test Considering Makeup Test for Missile Accuracy," KIMST Annual Conference Proceedings, 2016.
- [8] Andre Kleyner. etc, "Bayesian Techniques to reduce the sample size in Automotive Electronics Attribute Testing," Department of Statistics Purdue University West Lafayette, June 1996.
- [9] Richard E. etc, "Reliability Growth during a Development Testing Program," American Statistical Association, Feb. 1966.
- [10] Defence Standard 00-42, Reliability and Maintainability(R&M) Assurance Activity, Part 1: One-Shot Devices/Systems, UK Ministry of Defence, Defence Standard 00-42/Issue 2, February 2008.
- [11] Reliability Information Analysis Center(RIAC), Analysis of One-Shot Devices, START, Vol. 7, No. 4, 2000.
- [12] Donald. P. G., Patricia A. J., "Testing or Fault-Finding for Reliability Growth: A Missile Destructive-Test Example," Naval Research Logistics, 1997.
- [13] Defense Acquisition Program Administration Provisions, DAPA, 2017. 06. 21.
- [14] Defense Capability Improvement Business Directive, DAPA, 2017. 06. 05.