

시험 장비의 용량제한을 고려한 무고장 신뢰성 시험의 경제적 설계

한숙현* · 윤원영**† · 서순근***

* 한국산업기술시험원

** 부산대학교 산업공학과

*** 동아대학교 산업경영공학과

Economic Design of A Zero-Failure Reliability Demonstration Test Considering Capacity Limitation of Test Equipment

Han, Sook Hyun* · Yun, Won Young**† · Seo, Sun Keun***

* Korea Testing Laboratory

** Department of Industrial Engineering, Pusan National University

*** Department of Industrial and Management Systems Engineering, Dong-A University

ABSTRACT

Purpose: After product development, a Reliability Demonstration Test(RDT) is performed to confirm that the target life has been achieved. In the RDT, there are cases where the test equipment cannot accommodate all samples. Therefore, this study considers a test method to most economically demonstrate the target life of the product at a certain confidence level when the sample size is larger than the capacity of the test equipment.

Methods: If the sample size is larger than the capacity of the test equipment, test equipments may be added or the test time of individual samples may be increased. So the test method is designed to cover this situation with limited capacity. A zero-failure test method is applied as a test method to RDT. To minimize the cost, the test cost is defined and the cost function is obtained. Finally, we obtain the optimal test plan.

Results: A zero-failure test method is designed when the sample size is larger than the capacity of the test equipment, and the expected total cost is derived. In addition, the process of calculating the appropriate sample size, test time, and number of test equipment is illustrated through an example, and the effects of model parameters to the optimal solutions are investigated numerically.

Conclusion: In this paper, we study a zero-failure RDT with test equipment that has limited capacity. The expected total cost is derived and the optimal sample size, test time, and number of test equipment are de-

● Received 5 August 2021, 1st revised 7 September 2021, accepted 13 September 2021

† Corresponding Author(wonyun@pusan.ac.kr)

© 2021, Korean Society for Quality Management

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-Commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

terminated to minimize the expected total cost. We also studied numerical examples and for further studies, we can relax some restrictions in the test model and optimize the test method.

Key Words: A Zero-Failure Test, Economic Design, Reliability Demonstration Test, Cost Model

1. 서 론

기업들은 신제품 경쟁력 향상을 위해 개발주기를 단축하여 상당히 짧은 시간 내에 신제품을 출시하고 있다. 새로운 제품으로 소비자의 이목을 끌고 경쟁사와의 기술적 우위를 선점하는 것이 필요하기 때문이다. 기업들이 어려운 점은 제품의 개발 기간이 단축된다고 해서 신뢰성 평가를 생략하는 것이 불가능하다는 것이다. 제품의 신뢰성이 저하되어 갑작스럽게 고장이 발생하게 되면 상당한 비용을 초래하는 것은 물론 사회적인 혼란도 야기하는 경우가 종종 발생하기 때문이다(Lee, 2020). 따라서, 민수분야/군수분야 가릴 것 없이 제품 개발 시 신뢰성 평가에 대한 관심을 지속적으로 기울이고 있다. '19년 7월 방위사업청은 군수품 품질관리 체계의 효율화와 군수품 품질 신뢰성 확보를 위해 군수품 품질관리 기본계획을 수립하고(Seo et al., 2020), 민수분야의 기업들도 신뢰성 기반의 품질확보를 위해 노력하고 있다(Jeong et al., 2018).

제품의 신뢰성을 확보하기 위해서는 신뢰성시험이 필수적이다. 제품의 신뢰성이란 일정 기간 동안 사용 환경에서 고장 없이 기능을 수행할 수 있는 가를 의미하기 때문에 제품의 목표 시간이 증가할수록 신뢰성시험에 대한 시간도 증가하게 된다. 시험 시간의 증가는 시험 장비 및 인력 투입 등의 증가로 이어져 비용을 상승시키게 된다. 기업은 비용 절감을 통한 최대 이익 실현으로 존립하기 때문에 경제적으로 신뢰성시험을 수행하는 연구가 필요하다.

신뢰성시험을 위해서는 시험 장비가 필수적인데 대부분의 시험 장비는 용적이 정해져 있기 때문에 시험할 수 있는 시료 수가 제한될 수 있다. 본 연구에서는 시험 장비의 용적 한계로 시험 장비 한 대가 준비된 모든 시험 시료를 수용할 수 없는 경우 최소 비용으로 신뢰성 입증시험을 설계하는 방법에 대해 논의하고자 한다. 시험 장비의 용적 제한이 있는 경우 모든 시료를 한 번에 시험하는 경우보다 고려되어야 할 사항들이 존재한다. 첫 번째, 추가 시험 장비의 도입 여부이다. 추가 장비를 도입하여 시험을 수행할 수도 있고, 시험 시료 수를 시험 장비의 최대 시료 용적 수로 정하고 시험 시간을 증가할 수도 있다. 1 대의 장비만을 사용하여 반복적으로 시험을 수행할 수도 있지만 시험 기간이 크게 증가하여 고려하지 않는다. 만약 2 대의 시험 장비가 필요할 때 1 대의 장비로 시험할 경우 시험 시간은 두 배가 되는데 이는 소품종최근 개발 기간의 단축이 기업의 경쟁력의 일부분이 되는 상황에 맞지 않기 때문이다. 두 번째, 추가 시험 장비를 도입할 경우 추가 장비 사용료 및 시동비용이 발생하기 때문에 비용을 고려해야 한다. 이 때 시험 장비 도입으로 인한 추가 비용은 시료 수에 단계적으로 상승하는 비용이다. 준비된 시료를 시험 장비에 설치 시 시험 장비의 용적 한계를 초과할 때마다 추가적 장비가 투입되기 때문이다. 세 번째, 장비가 수용 가능한 최대 시료 수를 시험하는 장비와 장비가 수용 가능한 최대 시료 수보다 적은 시료 수를 시험하는 장비로 구분된다. 즉 시료가 가득 채워지는 장비와 가득 채워지지 않은 장비로 구분되는 것이다. 예를 들어 시료 수는 총 7 개 이고 시험 장비가 최대 3 개 시료를 수용 할 수 있을 때 가득 채워지는 시험 장비는 2 대가 되고, 가득 채워지지 않은 시험 장비는 1 대가 된다. 일반적으로 시료를 가득 채워 시험하는 것이 시험 장비 사용에 대한 효율을 증가시킨다. 이러한 이유로 최대한 시험 장비에 시료를 가득 채우기 때문에 두 가지 형태의 시험 장비로 구분된다. 가득 채우지 못한 시험 장비의 사용 유무 혹은 각 장비의 시간배분 등 각 장비의 운용 방법에 따라 총 시험 비용에 영향을 미치기 때문에 각 시험 장비의 운용 방법이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 상기 특징을 고려하여 경제적 신뢰성 입증시험 설계 방법에 대해 제시하고자 한다. 신뢰성 입증시험에 사용하는 방법으로는 가장 널리 사용되고 있는 무고장시험을 적용하였다.

제 2장에서는 관련된 이론적 배경에 대해 설명하였다. 제 3장에서는 본 연구에서 제안하는 용적이 제한된 시험장비를 사용할 때의 경제적 시험 설계에 대해 상세히 설명하였다. 제 4장에서는 예제를 통해 시험 설계를 수행하고 본 연구의 특징들을 살펴보았다. 끝으로 제 5장에서는 결론과 향후 연구방향을 제시한다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

신뢰성 입증시험에서 가장 널리 사용되는 무고장시험은 사전에 정해진 시료 수로 일정 시간동안 시험을 수행하여 하나의 고장도 발생하지 않으면 요구되는 신뢰도 요건을 충족한다고 판정한다. 자동차, 산업용 기계 부품, 건설 및 농기계용 증장비는 고가의 품목이 많고 수명시험에 소요되는 비용도 전자·전기 부품 등에 비해 상당히 높아 적은 시료 수나 시험 시간이 요구되는 방식을 사용한다. 또한 이러한 시험 방법은 시험이 수행되는 동안 성능 측정이나 고장에 대한 모니터링을 요구하지 않기 때문에 비교적 간편하여 많이 사용되고 있다(Yang, 2013; Lu and Rudy, 2001; Meeker, et al., 2004; Ke, 1999; Wasserman, 2002).

무고장시험은 시료 수를 계획된 시험 시간 동안 시험을 수행하여 고장이 발생하지 않으면 대상 제품이 특정 신뢰수준에서 신뢰도가 목표 신뢰도인 R_0 이상임을 입증할 수 있는 시험 방법이다. 시료 수 n 개를 t_0 시간 동안 시험하여 t_0 시점까지 고장 난 개수 $X(t_0)$ 가 임계 고장 개수 c 보다 적으면, 제품의 신뢰도가 목표 신뢰도인 R_0 이상임을 입증하게 된다. 여기서 $X(t_0)$ 은 이항분포를 따르며 신뢰수준 CL 로 입증하는 시험을 만족하기 위한 식을 (1)와 같이 식을 세울 수 있다.

$$Pr[X(t_0) \leq c] = \sum_{i=0}^c \binom{n}{i} (1-R_0)^i R_0^{n-i} \leq 1-CL \quad (1)$$

c , R_0 , CL 이 결정되면 상기 식을 만족하는 최소 시료 수를 구할 수 있다. 무고장시험은 고장이 0 이므로 필요한 시료 수는 식 (2)를 만족하는 최소의 정수가 된다.

$$n \geq \frac{\ln(1-CL)}{\ln(R_0)} \quad (2)$$

이와 관련된 연구로 Kwon (2011; 2012)는 시험 시간과 시험 비용을 고려한 입증시험을 설계하였다. 동일한 신뢰수준으로 동일한 백분위수명을 보증하는 시험방식에는 다양한 시료 수와 시험 시간의 조합이 존재한다. 입증시험 시 시료 제작비용 혹은 시험에 사용되는 장비 사용료, 에너지 비용 등 시험 시간과 관련된 비용이 높은 경우, 적절한 시료 수와 시험 시간의 조합을 선택함으로써 시험 비용을 최소화하는 시험 방법을 연구하였다.

또한 사전정보를 활용하여 시험 시간 혹은 시료 수를 줄이는 방법들에 대한 연구와 비용함수를 사용하여 시험 비용을 최소화 하는 시험 설계 방법들이 연구되었다. 시험 대상 제품의 신뢰성에 대해 사전 정보를 알 수 있을 때 이 정보를 사전 분포(prior distribution)로 활용한 베이지안(Bayesian) 시험방법을 고안한 것이다. 다수의 부품으로 구성된 시스템의 신뢰도 입증을 위한 시험에서 부품의 신뢰성 혹은 시험 정보를 활용하여 시스템 신뢰도를 사전 정보로 도출하고, 이를 시스템 신뢰성 입증시험 설계에 활용하는 베이지안 시험방법들이 Martz and Wailer (1990), Coolen et al. (2005), 그리고 Rahrouh (2005) 등에 의해 연구되었다. 이러한 연구에서는 시험 시간을 줄이는 것에

목적을 두었으며 비용과 연계성은 없었다.

무고장시험 외에도 허용 고장 개수를 일반화한 c -고장 허용 시험 계획의 시료 수도 수치적 방법으로 구할 수 있다. 하지만 허용 고장 수가 증가할수록 시험 시간이 증가하기 때문에 현실에서는 1-고장 허용 시험 계획이 무고장 입증시험 계획의 대응으로 활용되고 있다. 한편, 1-고장 보다 합격 확률을 낮추고, 무고장보다 합격 확률을 높여 각 단점을 절충하는 입증시험 설계도 가능하다. Seo (2015)은 무고장 입증시험보다 실증확률을 높이면서 1-고장 허용 실증시험의 요구 시험 시간을 줄일 수 있는 새로운 계수-계량형 실증시험계획을 개발하였다.

소개된 모든 선행연구에서는 시험 시 시험 장비 1대가 모든 시료 수를 수용 가능하다는 전제하에 연구가 진행되었다. 하지만 현실에서는 한 대의 시험 장비에 계획된 시료를 모두 시험하지 못하는 경우가 발생한다. 시험 장비 대비 비교적 큰 사이즈의 시료를 시험하는 경우, 대용량 시험 장비가 부재할 때, 시험 장비 내에 보조 지그 설치 등 시료 수용 공간부족 등의 경우가 여기에 해당한다. 따라서 시험 장비가 수용할 수 있는 시료 수가 제한될 때 경제적으로 입증시험이 가능한 시험 설계 연구가 필요하다.

3. 연구 설계

3.1 용적제한을 고려한 무고장시험 계획

총 시험 시료 수를 n , 시험 장비가 최대 수용 가능한 시료 수(sample capacity)를 d 라고 할 때 $n > d$ 인 경우의 무고장시험 계획에서 시험 장비 수와 시료 수, 시험 시간을 <Table 1>과 같이 정의하였다.

Table 1. Defining the Test Elements($n > d$)

Type	Sample size	Test time(h)	The number of test equipment	Example ($n=13, d=5$)
Full test equipment	$n_1 (= \lfloor \frac{n}{d} \rfloor d)$	t_1	$\lfloor \frac{n}{d} \rfloor$	- 2 equipment - 10 samples
Not full test equipment	$n_2 (= n - \lfloor \frac{n}{d} \rfloor d)$	t_2	1	- 1 equipment - 3 samples
Sum	n	$Max(t_1, t_2)$	$\lfloor \frac{n}{d} \rfloor + 1$	- 3 equipment - 13 samples

$n > d$ 인 경우는 시험 장비의 최대 수용 시료 수 보다 시험 시료 수가 많기 때문에 한 대 이상의 시험 장비가 필요하다. 시험 장비에 시료를 차례대로 채우면 시료를 가득 채운 시험 장비와 시료를 가득 채우지 못한 장비, 두 가지 형태의 장비로 구분된다. 시료를 가득 채운 상태에서 시험하는 것이 가장 효율적이기 때문에 시험 장비에 시료를 최대한 가득 채워나가는 하미, 마지막 시험 장비에만 시료를 가득 채우지 못하는 상태가 되어야 한다. 이를 기호로 표현하면, 장비의 수용 능력만큼 시료를 가득 채운 시험 장비 수는 $\lfloor \frac{n}{d} \rfloor$ 대가 되고, 시료를 가득 채우지 못한 시험 장비 수는 1 대가 된다. 총 시험에 필요한 총 시험 장비 수는 $\lfloor \frac{n}{d} \rfloor + 1$ 또는 $\lceil \frac{n}{d} \rceil$ 가 된다. 여기서 $\lfloor \cdot \rfloor$ 기호는 바닥 함수(floor function)를, $\lceil \cdot \rceil$ 기호는 천장 함수(ceiling function)를 뜻한다. 또한 최대 수용 능력만큼 시

료를 채운 시험 장비들에 할당 되는 시료 수는 가득 채운 시험 장비 수와 장비가 최대 수용 가능한 시료 수의 곱으로 나타 낼 수 있으며 $\left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor d$ 로 표현된다. 잔여 시료를 수용하는 한 대의 시험 장비가 수용하는 시료 수는 총 n 개의 시료에서 장비가 최대 수용할 수 있는 시료 수만큼 채운 장비들에게 할당된 시료 수를 제외한 것이 되므로 $n - \left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor d$ 로 표현할 수 있다.

시험 시간은 시료를 가득 수용한 시험 장비들의 시험 시간을 t_1 으로 정의하고 나머지 잔여 시료를 수용하는 한 대의 시험 장비의 시험 시간을 t_2 로 정의하였다. 총 시험 시간은 t_1 과 t_2 중 큰 값이 된다.

한편 본 연구에서는 백분위수명 산출 시 지수분포를 수명분포로 가정하였다. 지수분포는 연속분포 중 유일하게 무기역성을 가지며 고장률이 일정한 분포이다. 다른 분포에 비해 수학적 계산의 용이성과 통계적 추정과 가설검정법이 확립되어 있기 때문에 신뢰성 분석에서 널리 이용된다. 수명 T 가 지수분포를 따를 경우 $T \sim Exp(\lambda)$ 로 표현하며, $1/\lambda$ 는 척도모수(scale parameter)이다. 지수분포의 신뢰도는 (3)과 같다.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{3}$$

무고장시험은 목표 백분위수명 $B_{100p} = t_p$ 를 목표 신뢰수준 CL 로 입증하기 위해 n 개의 시료 수로 시험을 수행하여 시험 시간 t_0 동안 고장이 없으면 수명을 입증할 수 있는 시험으로 목표 백분위수명의 신뢰도는 (4)이며

$$R(t_p) = e^{-(\lambda_p t_p)} = 1 - p \tag{4}$$

$$\text{단, } \lambda_p = -\ln(1-p)/t_p$$

시험 장비가 시료 수 n 개를 모두 수용 가능할 경우, 목표 백분위수명($B_{100p} = t_p$)을 입증하기 위해 λ_p 인 신뢰도 함수를 사용하여 t_0 시점까지 시험 시료 수 n 개 모두 고장이 발생하지 않을 확률은 $[R(t_0)]^n = [e^{-(\lambda_p t_0)}]^n$ 이며, 일반적으로 소비자 위험률보다 작아져야 하는 무고장시험을 수식으로 표현하면 식(5)과 같다.

$$\Pr[X(t_0) = 0] = [R(t_0)]^n = [e^{-(\lambda_p t_0)}]^n \leq 1 - CL \tag{5}$$

본 연구에서는 $n > d$ 인 경우로 최대 수용 능력만큼 시료를 가득 채운 시험 장비와 가득 채워지지 못한 시험 장비로 나누어진다. 앞서, 가득 채운 시험 장비(이후 t_1 시험 장비)의 시험 시간은 t_1 , 가득 채워지지 못한 시험 장비(이후 t_2 시험 장비)의 시간을 t_2 로 정의하였다. 총 시료 수 n 개를 $\left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor d$ 개(t_1 시험 장비의 시료 수)와 $n - \left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor d$ 개(t_2 시험 장비의 시료 수)로 나누어 각각의 시험 장비에 장착하고, 목표 백분위수명($B_{100p} = t_p$)을 입증하기 위해 척도모수가 λ_p 인 신뢰도 함수를 사용하여 각 장비 별로 t_1, t_2 시점까지 모두 고장이 발생하지 않을 확률이 소비자 위험률 보다 작아지는 식은 (6)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Pr[X(t_1) = 0] \times \Pr[X(t_2) = 0] &= [R(t_1)]^{\lfloor \frac{n}{d} \rfloor d} \times [R(t_2)]^{n - \lfloor \frac{n}{d} \rfloor d} \\
 &= e^{-(\lambda_p t_1) \lfloor \frac{n}{d} \rfloor d} \times e^{-(\lambda_p t_2)(n - \lfloor \frac{n}{d} \rfloor d)} \leq 1 - CL
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

t_1 시험 장비의 시료들이 t_1 시점까지 고장이 발생하지 않을 확률과 t_2 시험 장비의 시료들이 t_2 시점까지 고장이 발생하지 않을 확률을 곱한 값을 소비자 위험률보다 작게 하면 $n > d$ 인 경우의 무고장시험 계획을 세울 수 있다. 식의 간결화를 위해 t_1 시험 장비 혹은 t_2 장비가 하나도 사용되지 않은 경우와 $d=1$ 인 경우는 빈번히 발생하지 않는 경우로 이를 제외하고 $m = \lfloor \frac{n}{d} \rfloor$, $d \geq 2$ 로 치환하면, n_1 (t_1 장비 시료 수)는 md , n_2 (t_2 장비 시료 수)는 $n - md < d$ 가 된다. 두 장비의 구분이 없이 총 시료 수에 대한 시험시간을 총 시험 시간(Total test on time)을 $TTT_0 (= nt_0)$ 라 하고, 식 (6)을 최소로 하는 t_1 에 대하여 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 t_1 &= \frac{t_p \frac{\ln(1-CL)}{\ln(1-p)} - (n - \lfloor \frac{n}{d} \rfloor d)t_2}{\lfloor \frac{n}{d} \rfloor d} \\
 &= \frac{TTT_0 - (n - md)t_2}{md}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

이와 같이 시험 장비의 용적이 제한된 경우 목표 입증수명($B_{100p} = t_p$)과 특정 CL 을 만족하는 다양한 (n, t_1, t_2) 조합이 가능한 무고장시험 식을 도출하였다.

3.2 시험 비용 모델

입증시험 비용을 크게 시료 제작비, 인건비, 시험 장비 비용, 시험환경 구성비, 간접비 등으로 분류하여 <Table 2>와 같이 정의하였다. 결과적으로 시료 수와 비례적으로 증가하는 비용을 C_n , 시료 수에 단계적으로 증가하는 (즉, 장비의 수에 의존하는) 비용을 C_{st} , 시험 시간에 비례적으로 증가하는 비용을 C_t , 시료 수에 비례적으로 증가하며 t 에 관련된 비용을 C_{nt} , 시료 수에 단계적으로 비용이 증가하며 t 와 관련된 C_{stt} , 시료와 시험시간에 무관한 고정비 성격의 간접비를 C_f 등 총 6가지 형태의 비용으로 정의하였다. 예를 들어 고온에서 배터리 충/방전 시험을 진행할 경우 배터리 시료 제작비는 C_n , 시험자의 인건비 C_t , 시험 장비 관련 비용은 C_{stt} , 배터리 종류에 따른 충/방전 지그 제작비용을 C_{st} , 개개의 배터리를 운용할 때 발생하는 에너지 사용료 등 충/방전에 필요한 비용을 C_{nt} , 나머지 간접비를 C_f 로 할 수 있다.

Table 2. The definition of test costs

Cost type		Cost definition
Sample production		C_n
personnel expenses		C_t
The cost of using test equipment		C_{stt}
Composition of test environment	Auxiliary jig	C_{st}
	Individual consumable material	C_{nt}
Indirect cost		C_f

시료 수가 시험 장비의 수용 능력 보다 커지면 시료를 가득 채운 시험 장비들(t_1 시험 장비)과 가득 채우지 못한 하나의 장비(t_2 시험 장비) 두 가지의 형태로 구분된다. 이렇게 구분된 장비 형태는 n 과 d 의 관계에 따라 총 4 가지의 경우로 구분할 수 있다. 먼저 $n < d$ 일 때에는 시험 장비가 모든 시료를 수용할 수 있는 경우로 한 대의 시험 장비만 필요하다. 이 때 시험 장비는 시료가 가득 채워지지 않으므로 t_2 시험 장비만 사용하고, n 개의 모든 시료를 한 번에 시험한다. 두 번째는 $n = d$ 일 경우이다. 시험 장비가 수용 가능한 최대 시료 수로 1대의 시험 장비에서 시험을 수행하면 된다. 가득 채워지는 시험 장비이므로 t_1 시험 장비를 사용하며, 시료 수는 d 개 이다. 세 번째, $n > d$ 이면서 n 이 d 의 배수가 되는 경우이다. n 이 d 의 배수가 되면 모든 시험 장비들은 최대 수용 능력만큼 시료를 채울 수 있다. 따라서 t_1 시험 장비에서 모든 시료를 시험하며 $\lfloor \frac{n}{d} \rfloor$ 대의 시험 장비가 필요하다. 네 번째, $n > d$ 이면서 n 이 d 의 배수가 아닌 경우이다. n 이 d 의 배수가 아니면 t_1 시험 장비, t_2 시험 장비 두 가지 시험 장비가 모두 사용된다. t_1 시험 장비에서는 $\lfloor \frac{n}{d} \rfloor$ 대의 장비로 $\lfloor \frac{n}{d} \rfloor d$ 개의 시료를 시험하며, t_2 시험 장비에서는 1대의 시험 장비로 $(n - \lfloor \frac{n}{d} \rfloor d)$ 개의 시료 수를 시험한다. 즉 $\lfloor \frac{n}{d} \rfloor + 1$ 대의 시험 장비를 사용하게 된다. 이러한 4가지 조건에 따른 시료 수와 시험 장비 대수를 <Table 3>과 같이 정리하였다.

Table 3. The sample size and the number of test equipment according to the relationship between n and d

No.	Relationship between n and d		Sample size		The number of equipment		Sum of equipment
			t_1 equipment (full)	t_2 equipment (not full)	t_1 equipment (full)	t_2 equipment (not full)	
1	$n < d$		0	n	0	1	1
2	$n = d$		n	0	1	0	1
3	$n > d$	$n = \text{'multiples of } d\text{'}$	$\lfloor \frac{n}{d} \rfloor d$ (d per equipment)	0	$\lfloor \frac{n}{d} \rfloor$	0	$\lfloor \frac{n}{d} \rfloor$
4		$n \neq \text{'multiples of } d\text{'}$	$\lfloor \frac{n}{d} \rfloor d$ (d per equipment)	$(n - \lfloor \frac{n}{d} \rfloor d)$	$\lfloor \frac{n}{d} \rfloor$	1	$\lfloor \frac{n}{d} \rfloor + 1$

앞서 정의한 6가지 비용과 상기 4가지의 n 과 d 의 관계를 고려하여 총 비용 함수를 모델링 할 경우 시료 수(n), 가득 채운 시험 장비의 시험 시간(t_1), 가득 채우지 못한 시험 장비의 시험 시간(t_2)의 함수로 나타낼 수 있다. 즉 총 비용(total cost)이 목적함수가 되고 결정 변수가 n, t_1, t_2 되는 식을 구하고자 한다. 이를 위해 각 세부 비용에 대한 특징을 살펴보고 최종적으로는 각 비용과 관계식을 곱한 후 모두 더하여 총 비용 모델을 도출하였다.

먼저 C_f 는 고정비로 단순히 n, t_1, t_2 와 관계가 없는 비용이다. 따라서 결정 변수에는 영향을 주지는 않지만 총 비용에 포함되는 비용으로 C_f 에 1을 곱한 값으로 표현할 수 있다. C_n 은 시료가 증가할수록 커지며 시료 수와 비례적으로 증가하는 비용으로 단순히 비용에 n 을 곱한 값으로 표현하였다. C_{st} 는 단계적으로 발생하는 비용으로 시험 장비 사용료와 장비 단위로 필요한 지그 제작비용이다. 따라서 이 비용은 시험 장비 대수만큼 필요하므로 총 시험 장비 수 $\left\lceil \frac{n}{d} \right\rceil$ 와 비용의 곱으로 표현하였다. C_t 는 시험완료 시간과 관계되는 비용을 나타낸다. 시험완료 시간은 t_1 과 t_2 중 최댓값으로 표현이 가능하다. <Table 3>에서 n 과 d 의 관계에 t_1 장비만 사용하는 경우, t_2 장비만 사용하는 경우, 모두 사용하는 경우를 적용하여 시험완료 시간을 수식으로 표현하면 (8)과 같다.

$$Max [U(n, d)t_1, I(n, d)t_2] \tag{8}$$

여기서,

$$\bullet I(n, d) = \begin{cases} 0, & \frac{n}{d} = \text{정수} \\ 1, & \frac{n}{d} \neq \text{정수} \end{cases} \quad \bullet U(n, d) = \begin{cases} 0, & n < d \\ 1, & n \geq d \end{cases}$$

t_1 시험 장비는 $n < d$ 인 경우에 사용되지 않는다. 이를 표현하기 위해 $U(n, d)$ 를 사용하여 $n < d$ 일 때는 t_1 에 0을 곱하여 시험 시간이 0이 되게 하고, $n \geq d$ 일 때는 1 값을 곱하여 시험 시간이 유효하게 표현되도록 하였다. t_2 시험 장비는 n 이 d 의 배수일 경우 사용하지 않는다. n 이 d 의 배수임을 확인하는 방법으로는 $\frac{n}{d}$ 가 정수이면 배수이고, 그렇지 않으면 정수가 아닌 것으로 판단하여 정수일 경우 t_2 에 0을 곱하여 t_2 시험 장비를 사용하지 않도록 하고, 정수일 때 1 값을 적용하여 t_2 시험 장비를 사용할 수 있도록 하였다. 이를 $I(n, d)$ 로 나타내었다. C_{nt} 는 시료 개별로 사용되는 물품 비용 혹은 에너지 비용 등으로 시료 수와 시험 시간에 비례하여 비용이 증가하며 비용과 시료 수, 시험 시간의 곱으로 표현하였다. t_1 시험 장비의 시료 수는 $\left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor d$ 이며 t_2 시험 장비는 $(n - \left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor d)$ 개이다. 이를 각각의 시간과 곱하여 $\left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor dt_1 + (n - \left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor d)t_2$ 로 나타내었다. 마지막으로 C_{stt} 는 시료 수에 단계적으로 비용이 증가하고 시험 시간에 비례적으로 증가하는 비용은 (9)과 같다.

$$U(n, d) \left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor t_1 + I(n, d)t_2 \tag{9}$$

C_{stt} 는 시험 장비 시동비용이다. 이를 수식으로 표현하면 t_1 시험 장비의 수는 $\left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor$ 개와 t_1 시간과의 곱이 된다. 여기에 C_t 비용과 마찬가지로 t_1 시험 장비는 $n < d$ 인 경우에 사용하지 않으므로 $U(n, d)$ 를 추가하였다. 또한 t_2 시험 장비 수는 1 대와 t_2 시험 시간을 곱하고 n 이 d 의 배수가 될 때 사용되지 않은 경우를 위해 $I(n, d)$ 를 추가로 곱하였다. 6가지 비용들에 대한 표현은 <Table 4>와 같다.

Table 4. The characteristics of costs

Cost Type	Cost relationship
C_f	1
C_n	n
C_{st}	$\left\lceil \frac{n}{d} \right\rceil$
C_t	$Max[U(n, d)t_1, I(n, d)t_2]$
C_{nt}	$\left\lceil \frac{n}{d} \right\rceil dt_1 + \left(n - \left\lceil \frac{n}{d} \right\rceil d \right) t_2$ (= TTT_0)
C_{stt}	$\left\lceil \frac{n}{d} \right\rceil U(n, d) t_1 + I(n, d) t_2$

각 비용과 관계된 식을 곱한 후 모두 더하여 총 시험 비용을 식 (10)와 같이 모델링하였다.

$$\begin{aligned}
 TC(n, t_1, t_2) = & C_f + C_n n + C_{st} \left\lceil \frac{n}{d} \right\rceil + C_t Max[U(n, d) t_1, I(n, d) t_2] \\
 & + C_{nt} TTT_0 + C_{stt} \left\lceil \frac{n}{d} \right\rceil U(n, d) t_1 + I(n, d) t_2
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

3.3 경제적 무고장시험 설계

시험 장비가 시료 수를 제한적으로 수용할 경우의 특정 신뢰수준에서 백분위수명을 입증할 수 있는 무고장시험 방법에는 다양한 (n, t_1, t_2) 조합이 존재하며, 적절한 (n, t_1, t_2) 조합을 선택하여 비용을 최소화 할 수 있는 시험 방법을 찾는 것이 중요하다. 최소 시험 비용을 갖는 (n, t_1, t_2) 조합은 무고장시험 식과 비용함수를 활용하여 찾을 수 있다. 총 비용함수는 3 개의 결정 변수(n, t_1, t_2)를 가진 목적 함수가 되고, 이 목적 함수는 <Table 5>와 같이 최솟값을 갖되 무고장시험 식이라는 제약 조건을 만족해야 하는 최소 비용의 문제가 된다.

Table 5. The optimization cost problem

Elements	Minimum cost problem
Objective function	Total cost function
Decision variables	n, t_1, t_2
Constrains	A zero-failure demonstration test equation

무고장시험 식 중 t_1 으로 정리한 (7)를 총 비용함수 (10)에 대입하여 (11)과 같이 하나의 식으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 TC(n, t_2) = & C_f + C_n n + C_{st} \left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor + C_{t, Max} \left[U(n, d) \frac{TTT_0 - (n - \lfloor \frac{n}{d} \rfloor d) t_2}{\lfloor \frac{n}{d} \rfloor d}, I(n, d) t_2 \right] \\
 & + C_{nt} \left[\left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor d \frac{TTT_0 - (n - \lfloor \frac{n}{d} \rfloor d) t_2}{\lfloor \frac{n}{d} \rfloor d} + (n - \lfloor \frac{n}{d} \rfloor d) t_2 \right] + C_{stt} \left[U(n, d) \left\lfloor \frac{n}{d} \right\rfloor \frac{TTT_0 - (n - \lfloor \frac{n}{d} \rfloor d) t_2}{\lfloor \frac{n}{d} \rfloor d} + I(n, d) t_2 \right]
 \end{aligned} \tag{11}$$

고정된 n 을 \dot{n} 이라 했을 때 \dot{n} 에서 t_2 시간을 한 단계씩(1시간) 상승시키며 비용 변화를 살펴본다. \dot{n} 에서 비용이 최소가 되는 (\dot{n}, t_2) 조합을 찾고, 여기서 t_2 값을 식 (7) 에 적용하여 (\dot{n}, t_1, t_2) 조합을 완성한다. 이러한 과정을 다양한 n 값에 적용하여 어떠한 n 값에서 최소 비용이 산출되는지를 찾는다. 즉 전역 최적해(global optimization)인 (n, t_1, t_2) 조합을 찾아 최적 시험 설계를 완료한다.

본 연구에서는 상기 과정을 엑셀의 VBA를 이용하여 코딩을 수행한 후 제 4장 수치 예제의 결과를 산출하고자 한다.

4. 수치 예제

4.1 적용사례

한 장비의 모듈의 무고장 신뢰성 입증시험 계획을 세우고자 한다. 입증 목표수명(B_{100p})은 1,000 시간, $p = 10 \%$, 신뢰수준(CL)은 80 %, 장비의 최대 수용 시료 수(d)는 7 개이다. 관련 시험 비용은 <Table 6>과 같다. C_f 는 시험 결정 변수에 영향을 미치지 않으므로 고려하지 않기로 한다. 시험 장비의 감가상각비는 본 논문에서는 고려하지 않았다.

Table 6. The value of cost

No.	Cost type	Value(ratio)
1	C_n	5,500
2	C_{st}	1,000
3	C_t	40
4	C_{nt}	5
5	C_{stt}	10

예제에 대한 무고장 입증시험 설계에서 시험비용이 최소가 되는 시료 수와 각 시험 장비의 사용 시간 조합은 다음과 같다.

$$n = 13 \text{ 개}, t_1 = 1,175 \text{ 시간}, t_2 = 1,175 \text{ 시간}, \text{ 시험장비 } 2\text{대}, \text{ 시험비용 } 220,381$$

결과적으로 최대 수용 가능한 시료 수가 7 개인 시험 장비를 사용하며 총 13 개의 시료를 총 2 대의 장비(t_1 시험 장비에 시료 7 개, t_2 시험 장비에 시료 6 개를 설치)를 사용하여 각각의 시험 장비에서 1,175 시간 동안 시험하여

하나의 고장도 발생하지 않으면 80 % 신뢰수준으로 목표 수명인 B_{10} 1,000 시간을 입증할 수 있는 시험 계획을 설계하였다.

Table 7. The values of t_1 , t_2 , TC for different n ($n = 12 \sim 14$)

Item	...	n	t_1	t_2	TC	n	t_1	t_2	TC	n	t_1	t_2	TC	...
Value	...	12	2,182	0	252,489	13	2,182	0	257,989	14	1,091	0	220,844	...
		12	2,182	1	253,463	13	2,181	1	258,956	14	1,091	0	220,844	
		12	2,181	2	253,437	13	2,181	2	258,923	14	1,091	0	220,844	
		12	2,180	3	253,411	13	2,180	3	258,890	14	1,091	0	220,844	
		12	2,179	4	253,386	13	2,179	4	258,857	14	1,091	0	220,844	
		12	2,179	5	253,360	13	2,178	5	258,824	14	1,091	0	220,844	
TC_{min}	...	12	1,273	1,273	220,757	13	1,175	1,175	220,381	14	1,091	-	220,844	...

<Table 7>에서 각 n 에서의 최소 비용 TC_{min} 을 찾았고, 이를 그래프로 표현한 것이 <Figure 1>이다. 그래프를 보면 $n = 1$ 일 때부터 TC_{min} 이 감소하다가 $n = 13$ 일 때를 기점으로 비용이 다시 상승하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 최소 비용을 갖는 전역 해는 $n = 13$ 일 때이며 이 때 $t_1 = 1,175$, $t_2 = 1,175$ 값을 가지므로 ($n = 13$, $t_1 = 1,175$, $t_2 = 1,175$) 조합을 도출되며 비용은 220,381이다.

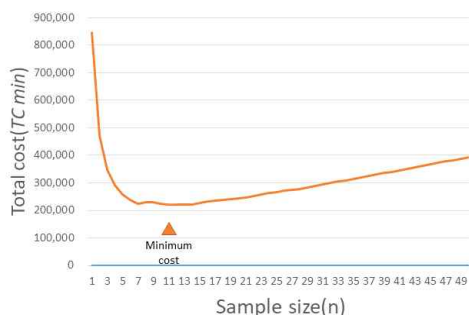
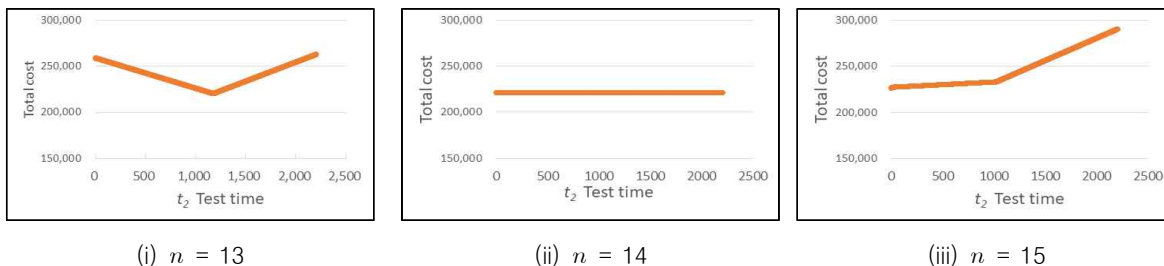


Figure 1. Total Cost curve

한편 n 이 고정된 상태에서 t_2 증가 시 총 비용(TC)의 변화는 <Figure 2> 와 같이 3 가지의 형태로 나타난다.



(i) $n = 13$

(ii) $n = 14$

(iii) $n = 15$

Figure 2. Total Cost curves of t_2

- (i) 총 비용이 감소하다가 증가하는 그래프
- (ii) 총 비용이 t_2 에 영향을 받지 않은 그래프
- (iii) 총 비용이 꾸준히 증가하는 그래프

(i)은 <Figure 2>의 $n = 13$ 그래프에서 볼 수 있다. t_2 가 증가함에 따라 점차 총 비용이 감소하고, $t_1 = t_2$ 일 때 가장 최소의 비용이 발생한다. 따라서 $n = 13$ 일 때는 시험 장비 2 대(t_1 시험 장비 1 대, t_2 시험 장비 1 대)로 같은 시험 시간동안 시험을 진행하는 것이 가장 경제적인 시험 계획이 된다. 또한 t_2 가 지속적으로 증가 시 t_1, t_2 가 교차하는 지점이 발생하는데 이러한 교차점에서 최소 비용을 갖게 된다. (ii)는 <Figure 2>의 $n = 14$ 그래프에서 볼 수 있다. 그래프를 보면 t_2 가 증가함에도 총 비용은 증가하지 않는데 이는 총 비용과 t_2 는 관계가 없다는 것이다. $n(14$ 개)은 $d(7$ 개)의 배수로 장비의 용적 한계만큼 시료를 가득 채울 수 있어 잔여 시료만을 수용하는 t_2 장비가 사용되지 않는다. 따라서 가득 채운 t_1 시험 장비 2 대만을 사용하여 시험을 진행하는 것이 가장 경제적인 시험 계획이 된다. (iii)는 <Figure 2>의 $n = 15$ 그래프에서 볼 수 있다. t_2 가 증가함에 따라 총 비용이 계속 증가하여 t_2 시험 장비를 사용하지 않는 것이 가장 경제적인 경우이다. 시료 수는 15개지만 시험 장비($d = 7$) 2 대로 14 개의 시료만을 사용하여 긴 시간 시험하는 것이 3 대의 시험 장비로 15 개의 시료를 상대적으로 짧은 시간을 시험하는 것 보다 더 경제적으로 판단된 경우이다. 이는 1 개의 시료를 필요 이상으로 제작한 상태가 되기 때문에 전역 최적 해는 되지 못한다.

4.2 각 세부 비용 항목 변화에 따른 결정 변수의 변화

다음은 세부 비용 항목의 변화에 따라 시험 시간, 시료 수, 사용 시험 장비 수에 어떠한 변화를 주는지 살펴보기 위해 민감도 분석을 실시하였다. 각 세부 비용에 변화율 δ 를 곱하여 (n, t_1, t_2) 조합과 최소 비용을 도출하였다.

예를 들어 δ 값이 10 이고 새롭게 적용된 비용이 각각 $C'_n, C'_{st}, C'_t, C'_{nt}, C'_{stt}$ 일 때

$$C'_n = C_n \times 10 = 5,500 \times 10 = 55,000$$

$$C'_{st} = C_{st} \times 10 = 1,000 \times 10 = 10,000$$

$$C'_t = C_t \times 10 = 40 \times 10 = 400$$

$$C'_{nt} = C_{nt} \times 10 = 5 \times 10 = 50$$

$$C'_{stt} = C_{stt} \times 10 = 100 \times 10 = 1,000$$

← 의 값을 하나씩만 선택하여 기존 비용 대신 적용할 경우에 새로운 (n, t_1, t_2) 조합과 최소 비용을 도출하였다. 이 결과는 <Table 8>와 같다.

Table 8. Sensitivity Analysis

Cost type	δ	TC_{\min}	n	t_1	t_2	Total number of equipment
C_n	10	488,322	4	-	3,819	1
	5	367,633	5	-	3,055	1
	3	301,989	7	2,182	-	1
	1	220,381	13	1,175	1,175	2
	0.9	213,144	14	1,091	-	2
	0.5	182,344	14	1,091	-	2
C_{st}	10	233,989	7	2,182	-	1
	5	228,381	13	1,175	1,175	2
	3	224,381	13	1,175	1,175	2
	1	220,381	13	1,175	1,175	2
	0.9	220,181	13	1,175	1,175	2
	0.5	219,381	13	1,175	1,175	2
C_t	10	470,277	35	436	-	5
	5	362,181	21	727	-	3
	3	303,971	20	764	764	3
	1	220,381	13	1,175	1,175	2
	0.9	215,665	12	1,273	1,273	2
	0.5	181,344	7	2,182	-	1
C_{nt}	10	907,780	13	1,175	1,175	2
	5	525,892	13	1,175	1,175	2
	3	373,137	13	1,175	1,175	2
	1	220,381	13	1,175	1,175	2
	0.9	212,744	13	1,175	1,175	2
	0.5	182,193	13	1,175	1,175	2
C_{stt}	10	417,244	14	1,091	-	2
	5	308,133	14	1,091	-	2
	3	264,489	14	1,091	-	2
	1	220,381	13	1,175	1,175	2
	0.9	218,031	13	1,175	1,175	2
	0.5	208,027	12	1,273	1,273	2

<Table 8>을 보면 본 예제에서 (n, t_1, t_2) 조합에 가장 많이 영향을 주는 비용 항목은 C_n 과 C_t 이다. 시료 수와 비례적으로 증가하는 비용인 C_n 이 상승하면 시료 수를 줄이기 위해 시험 시간을 증가시킨다. 또한 시험 시간과 비례적으로 증가하는 비용인 C_t 가 상승하면, 시험 시간을 줄이기 위해 시료 수를 증가시킨다. 이는 시료 수와 시험 시간은 서로 상충되는 관계를 가지고 있기 때문이다. C_{st} , C_{stt} 비용은 주로 시험 장비 사용료와 시동비용을 나타내는데 (n, t_1, t_2) 조합에 큰 변화를 주지는 않지만 조금씩 서로 다른 영향을 주고 있다. C_{st} 비용이 상승하게 되면 시료 수를 줄이고 시험 시간을 늘리게 되는 반면, C_{stt} 비용이 상승하면 시료 수를 늘리면서 시험 시간을 줄여 총 비용

상승을 최소화 한다. C_{nt} 비용은 본 예제에서 총 비용 자체를 크게 증가시키는 역할을 하지만 최적 (n, t_1, t_2) 조합에는 거의 미치지 못한다. 이러한 이유는 시료 수와 시험 시간에 대한 관련 비용 중 C_n 비용이 시료 수와 시험 시간에 개별적으로 의존하지 않고 총 시험 시간에 비례하기 때문이다. 이러한 결과는 그래프로 정리해 볼 수 있다. <Figure 3>의 (i)은 각 비용에 따른 시료 수 변화이고 (ii)는 비용에 따른 시험 시간의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 총 시험 시간은 $\max(t_1, t_2)$ 를 사용하여 표현한 시간이다.

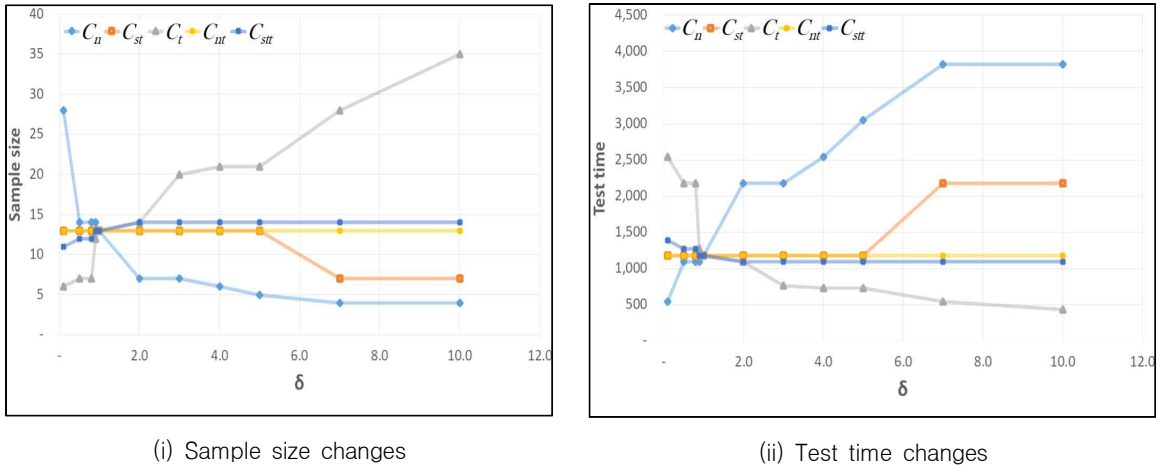


Figure 3. Changes of sample size and test time

각 세부 비용 항목 중에서 시료 크기와 시험 시간에 가장 크게 영향을 주는 비용 항목이 C_n 과 C_t 인 것을 <Figure 3>의 그래프 기울기 변화를 통해서도 확인 가능하다. C_{st} 와 C_{stt} 는 상대적으로 시료 수와 시험 시간에 변화를 크게 주지는 않으나 영향을 끼치고 있음을 확인할 수 있다. C_{nt} 는 비용 증가에 따라 일정한 총 시험 시간을 가지고 있어 영향을 주지 않은 요소로 확인되었다. 마지막으로 C_t 와 C_{stt} 는 시료 수와 비선형 관계를 보이는데 이는 시험 시동 시간에 따른 비용이 증가하면 시료 수를 늘려 총 시험 시간을 보존하기 위함이다. C_n, C_{st} 는 시험 시간과 비례적 관계를 보이는데 이는 시료가 고가 일수록 시험 시간을 늘려 부족한 시료 수에 대한 시험을 보충하기 위함이다.

4.3 t_2 시험 장비의 사용 특성

시험 장비에 최대한 많은 시료 수를 시험하는 것이 효율적임을 데이터를 통해 확인이 가능하였다. d 구간을 <Figure 4>와 같이 분리하여 시험 결과를 살펴보면 t_2 장비의 시료 수용 한계치(d)에 가까운 시료가 배정될수록 t_2 장비를 추가로 사용하여 시험을 진행하는 것이 경제적으로 나타났다. 반대로 t_2 장비에 시료가 적게 배정될수록 t_2 시험 장비를 사용하지 않고 시료를 가득 채운 t_1 장비에서만 좀 더 긴 시간을 시험하는 것이 경제적임을 확인할 수 있다.

결론적으로 최적 t_2 는 0 시간 또는 t_0 와 같은 시간, 두 가지 경우로 시험 시간이 도출된다. 이를 증명하기 위해 앞서 언급한 바와 같이 $t_0 (= TTT_0/n)$ 가 t_1 시험 장비와 t_2 시험 장비를 구분하지 않는 상황에서 개별 시료가 받아야 하는 시험 시간이고,

Decrease ← Use of t_2 test equipment → Increase

k_7	n	1	2	3	4	5	6	7
	TC	846,654	470,266	348,470	290,322	257,633	237,674	224,989
	t_i	-	-	-	-	-	-	2,182
k_8	n	8	9	10	11	12	13	14
	TC	230,489	229,716	225,037	222,211	220,757	220,381	220,844
	t_i	2,182	1,697	1,528	1,389	1,273	1,175	1,091
k_9	n	15	16	17	18	19	20	21
	TC	226,344	231,844	235,779	237,787	240,157	242,851	245,796
	t_i	1,091	1,091	899	849	804	764	727
k_{10}	n	22	23	24	25	26	27	28
	TC	251,296	256,796	262,296	266,759	270,383	274,146	278,022
	t_i	727	727	727	611	588	566	546
k_{11}	n	29	30	31	32	33	34	35
	TC	283,522	289,022	294,522	300,022	304,542	308,815	313,158
	t_i	546	546	546	546	463	449	436
k_{12}	n	36	37	38	39	40	41	42
	TC	318,658	324,158	329,658	335,158	340,569	345,138	349,748
	t_i	436	436	436	436	382	373	364
k_{13}	n	43	44	45	46	47	48	49
	TC	355,248	360,748	366,248	371,748	377,248	382,385	387,170
	t_i	364	364	364	364	364	318	312
} $d = 7$								

Figure 4. t_2 Test equipment characteristics

1) $t_2 > t_0$ 이면 즉, $t_2 = t_0 + \delta$, $\delta > 0$ 가 되면 최적 t_1 은 (12)와 같다.

$$t_1 = \frac{TTT_0 - (n - md)(t_0 + \delta)}{md} = \frac{mdt_0 - (n - md)\delta}{md} = t_0 - \frac{n - md}{md} \delta < t_0 \tag{12}$$

이 때 $t_2 = t_0$ 일 경우와 비교하여 총 비용의 증가분은 C_{stt} 와 C_t 증가분의 합으로 나타나는데

① C_{stt} 증가분은 (13)과 같으며,

$$\left[-m \left(\frac{n - md}{md} \delta \right) + \delta \right] = \frac{\delta}{d} [d - (n - md)] = \frac{\delta}{d} (d - n_2) > 0 \tag{13}$$

② C_t 증가분은 $\delta > 0$ 와 같다. ①과 ② 에서 모두 비용이 증가하므로 t_2 는 t_0 초과할 수 없다.

2) $t_2 < t_0$ 이면 즉, $t_2 = t_0 - \delta$ 가 되면, t_1 은 (14)와 같다.

$$t_1 = \frac{TTT_0 - (n - md)(t_0 - \delta)}{md} = \frac{mdt_0 + (n - md)\delta}{md} = t_0 + \frac{n - md}{md} \delta > t_0 \tag{14}$$

이 때 $t_2 = t_0$ 일 경우와 비교하여 총 비용의 증가분은 1)과 마찬가지로 C_{stt} 와 C_t 증가분의 합으로 나타나는데

① C_{stt} 증가분은 (15)와 같으며,

$$\left[m \left(\frac{n-md}{md} \delta \right) - \delta \right] = \frac{\delta}{d} [(n-md) - d] = \frac{\delta}{d} (n_2 - d) < 0 \tag{15}$$

② C_t 증가분은 (16)과 같다.

$$\frac{n-md}{md} = \frac{n_2}{n_1} \delta > 0 \tag{16}$$

t_2 는 ①과 ② 두 비용에 대한 합의 양수 여부에 의존한다. 총 비용의 변화 ΔTC 가 $C_t \frac{n_2}{n_1} \delta - C_{stt} \frac{\delta}{d} (d - n_2) > 0$
 $\Rightarrow C_t n_2 d > C_{stt} n_1 (d - n_2)$ 이면 δ 와 관계없이 $t_2 = t_0$ 가 된다. 반면에 $C_t n_2 d < C_{stt} n_1 (d - n_2)$ 이면 δ 가 커질 때 ΔTC
 가 점점 감소되므로 $t_2 = 0$ 이 된다. 결과적으로 1) 과 2) 로 인하여 $t_2 = 0$ 또는 $t_2 = t_0$ 의 값을 갖게 된다.

이를 $d=7, C_t=40, C_{stt}=10$ 일 때의 예제를 통해 확인해 보면

$n=13 \rightarrow n_1=7, n_2=6$ 일 때 $C_t n_2 d (= 1,680) > C_{stt} n_1 (d - n_2) (= 70)$ 이므로 $t_2 = t_0$ 이 되고,
 $n=14 \rightarrow n_1=14, n_2=0$ 일 때 $C_t n_2 d (= 0) < C_{stt} n_1 (d - n_2) (= 980)$ 이므로 $t_2 = 0$ 이 되며,
 $n=15 \rightarrow n_1=14, n_2=1$ 일 때 $C_t n_2 d (= 280) < C_{stt} n_1 (d - n_2) (= 840)$ 이므로 $t_2 = 0$ 이 되어 <Figure 4>에서
 의 n 값에 따른 결과를 비교하면 같은 결과를 확인할 수 있다.

시료 수가 증가할수록 t_1 의 시험 장비 및 시료 수가 증가하기 때문에 t_2 에 배정된 시료들이 받아야 하는 시험 시간을 t_1 장비의 시료들에 할당하기가 쉬워진다. 이는 수식에서도 살펴볼 수 있는데 $C_t n_2 d < C_{stt} n_1 (d - n_2)$ 에서 n 이 커질수록 n_1 이 증가하기 때문에 $t_2 = 0$ 이 되어 점차 t_2 시험 장비의 사용이 줄어들게 된다. 이러한 이유로 <Figure 4>의 k_7 을 넘어 k_8 부터 t_2 시험 장비의 사용이 사라진다. 또한 t_2 장비의 사용이 줄어드는 효과는 C_t 가 작을수록, C_{stt} 가 증가할수록 나타난다는 것을 수식을 통해 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 제한된 시료 수를 수용하는 시험 장비를 사용하는 경우의 경제적 무고장 입증시험 방식을 제안하였다. 하나의 시험 장비가 모든 시료 수를 수용하지 못할 경우 추가적 시험 장비가 필요하며 시험 장비 추가에 따른 비용이 증가한다. 이러한 경우를 고려하여 규정된 백분위수명을 특정 신뢰수준으로 입증하는 시험에서 비용을 최소화 하는 시험 설계 방법을 세우고 예시를 통해 문제 해결 과정을 기술하였다.

시험 장비의 최대 시료 수용 능력보다 시험 시료 수가 클 경우 시료를 가득 채운 시험 장비들과 시료를 가득 채우지 못한 상태에서 시험을 진행하는 시험 장비, 두 가지 형태의 시험 장비로 구분된다. 기존 한 대의 장비만을 고려한 무고장 신뢰성 입증시험에서 두 가지 형태의 시험 장비가 도입되는 상황을 고려하여 무고장 신뢰성 입증시험을 방법을 도출하였다.

시험 계획을 세울 시 가장 경제적인 시험 방법을 도출하기 위해 시험 비용의 요소들의 특징을 파악하고 이를 반영하여 총 비용함수를 모델화하였다. 제한된 시료 수를 수용하는 시험 장비를 사용하는 경우의 무고장 입증시험 식을 만족하면서 총 시험 비용을 최소화하는 n, t_1, t_2 를 산출하여 가장 경제적인 시험 설계를 하는 것이 주요 연구의 목적이었다.

가장 경제적인 n , t_1 , t_2 를 산출하는 방법을 예제에 통해 확인하였고 민감도 분석을 통해 몇 가지 특징을 알 수 있었다. 먼저, 시료 수와 시험 시간은 역의 관계를 성립하고 C_t 와 C_{st} 의 변화는 시료 수와 비례 관계를 가지며, C_n , C_{st} 의 증가는 시험 시간도 증가하는 비선형 관계를 갖는다. 또한 t_2 장비의 시험 시간은 0과 t_1 사이에서 최적 값이 산출 될 것이라는 예상과는 달리 $t_2 = 0$ 또는 $t_2 = t_0$ 두 가지 형태의 결과 값으로만 산출됨을 확인하였으며, 이를 수치적으로 증명하였다. 시험 장비 사용료가 극단적으로 높을 경우 t_1 장비만 사용하게 되며, 극단적으로 낮은 경우는 t_1 , t_2 시험 장비 모두 사용하는 것이 경제적 선택이 될 수 있다. 마지막으로 시료 수가 증가할수록 혹은 t_1 시험 장비 수가 많을수록 t_2 시험 장비를 사용하는 효율성은 떨어지게 되며, 이로 인해 t_1 시험 장비만을 사용하는 시험 계획이 도출된다.

이와 같이 용적이 제한된 시험 장비를 사용할 경우의 경제적 무고장 신뢰성 입증시험에 대해 기술하였다. 현실에서 시험 장비가 시료를 충분히 수용하지 못할 경우가 빈번히 발생되는데 이러한 경우 본 시험 방법을 적용함으로써 비용 절감에 기여할 수 있을 것으로 기대한다. 본 연구에서는 우발 고장형태를 기준으로 지수분포 기반의 시험 설계가 이루어졌지만 초기 고장 혹은 마모 고장을 고려한 시험 설계가 추가 연구로 진행 될 수 있으며, 비용 모델에서 인건비용과 시험비용을 산출 시 유희 시간과 시험 장비의 감가상각비를 고려하는 등의 좀 더 세밀한 연구가 진행될 필요가 있다.

REFERENCES

- Coolen, F. P., Coolen-Schrijner, P., & Rahrouh, M. 2005. Bayesian reliability demonstration for failure-free periods. *Reliability Engineering & System Safety* 88(1):81-91.
- Jeong, Y. K., Yoo, H. J., & Song, G. S. 2018. A Study on the shift to the reliability-based defense quality policy. *Journal of Korean Society for Quality Management* 46(2):193-210.
- Ke, H. Y. 1999. Sampling plans for vehicle component reliability verification. *Quality and Reliability Engineering International* 15(5):363-368.
- Kwon, Y. I. 2011. Economic design of zero-failure reliability qualification test. *Journal of Korean Society for Quality Management* 39(1):71-77.
- Kwon, Y. I. 2012. An economic design of reliability demonstration test for product with lognormal lifetime distribution. *Journal of Applied Reliability* 12(1):47-56.
- Lee, J. P. 2020. Optimal working cycles for minimal repair policy. *Journal of Korean Society for Quality Management* 48(1):201-214.
- Lu, M. W. & Rudy, R. J. 2001. Laboratory reliability demonstration test considerations. *IEEE Transactions on Reliability* 50(1):12-16.
- Martz, H. F. & Wailer, R. A. 1990. Bayesian reliability analysis of complex series/parallel systems of binomial sub-systems and components. *Technometrics* 32(4):407-416.
- Meeker, W. Q., Hahn, G. J., & Doganaksoy, N. 2004. Planning life tests for reliability demonstration. *Quality progress* 37(8):80-82.
- Rahrouh, M. 2005. Bayesian zero-failure reliability demonstration. Doctoral dissertation, Durham University 51-60.
- Seo S. K. 2015. Development of mixed reliability demonstration test plans. *Journal of Applied Reliability* 15(3):170-175.

- Seo, W. B., Yim, S. O., Choi, Y. H., & Kim, B. H. 2020. A Methodology Research on Development Stage of Submarine Vessel through QMST/QCG System. *Journal of the Korean Society for Quality Management* 48(3):521–534.
- Wasserman, G. 2002. *Reliability verification, testing, and analysis in engineering design* (Vol. 153); CRC Press.
- Yang, G. 2013. Heuristic degradation test plans for reliability demonstration. *IEEE Transactions on Reliability* 62(1):305–311.

저자소개

- 한숙현** 한성대학교 산업공학과를 졸업하고 부산대학교 산업공학과 석사학위를 취득하였다. 현재 한국산업기술시험원 항공국방신뢰성센터에서 근무하며 주요 연구분야는 신뢰성시험, 가속수명시험의 분석 및 설계이다.
- 윤원영** 서울대학교 산업공학과를 졸업하고 한국과학기술원(KAIST)에서 석 박사학위를 취득하였다. 현재 부산대학교 산업공학과에 재직하고 있으며 주요 연구 분야는 시스템신뢰성 분석, 보전모형 및 최적화이다.
- 서순근** 서울대학교 산업공학과를 졸업하고 한국과학기술원(KAIST)에서 석 박사학위를 취득하였다. 현재 동아대학교 산업경영공학과에 명예교수로 있으며 주요 연구 분야는 품질공학, 수명 및 열화시험의 설계 및 분석이다.