

2단계 신뢰성 실증시험의 통계적 설계

서순근[†]

동아대학교 산업경영공학과

Statistical Design of Two-Stage Reliability Demonstration Tests

Seo, Sun-Keun[†]

Dept. of Industrial & Management Systems Engineering, Dong-A University

Key Words : Reliability Demonstration Test, Two-Stage Test, Weibull Distribution, Zero or One Failure Test, Statistical Design

Abstract

In design verification and process validation stages, reliability demonstration tests(RDT's) are common practice in industry. A new two-stage RDT that is known to be more efficient than a corresponding single-stage one in terms of expected test duration for Weibull distribution is proposed. Zero or one failure two-stage plans to minimize expected test duration under Type I and hybrid censoring subject to satisfying consumer's risk at a specified reliability target are developed and a numerical example is provided to illustrate the proposed two-stage RDT plans and compared with other one- and two-stage plans.

1. 서 론

제품 수명주기단계의 설계 및 개발단계에서 완성된 설계안에 따른 시제품이 제품기획단계에서 규정된 기능적, 환경적, 신뢰성, 법적인 요건을 만족하는지 검증이 필요하다. 이런 업무를 산업계에서 설계검증(DV, design verification)이라 부르며 신뢰성 DV시험은 설계검증의 중요한 요소가 되며, 특히 설계 신뢰도를 검증하는데 유용하다. 이런 시제품이 DV시험을 통과하면 생산단계로 넘어가 최소 변동으로 설계요건을 만족하는 제품을 제조하는 공정설계가 수행된다. 따라서 양산 단계이전에 산업계에서 공정확인(PV, process validation)이라 명명되는 인증시험을 통과해야 한다. DV와 PV 단계에 실시되는 신뢰성 인증시험에는 신뢰성 실증시험(Reliability Demonstration or Substantiation

Test; RDT) 등이 주로 쓰인다. 즉, 제품이 신뢰도 요건을 만족시키는지 또는 새로운 설계가 예전 설계에 비해 신뢰도의 향상을 가져왔는지를 밝히고자 할 때 신뢰성 실증시험을 수행하게 된다.

신뢰성 실증시험에서 가장 널리 쓰이는 무고장시험(자동차 업계는 "bogey test"로 부름[9, 10])은 미리 정해진 크기의 표본으로 일정기간 동안 시험하여 하나의 고장이라도 발생하지 않으면 요구되는 신뢰도 요건을 충족한다고 판정한다. 특히 자동차, 건설 및 농기계용 중장비, 산업용 기계 부품 중에는 고가의 품목이 많고 수명시험에 소요되는 비용도 전자/전기 부품 등에 비해 월등히 높아 적은 시험단위나 시험시간이 요구되는 이런 시험방식을 선호한다. 또한 이런 유형의 시험은 시험기간 동안 성능의 측정이나 고장 모니터링을 요구하지 않기 때문에 실시하기가 용이하여 자동차 업계뿐만 아니라 산업계에서 널리 쓰이고 있다.

신뢰성 실증시험은 특정 신뢰수준(C)에 대해 신뢰도(R)가 주어진 기준을 초과하였는지를 실증하기 위한 신

[†] 교신저자 skseo@dau.ac.kr

* 이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

뢰성 시험으로, 신뢰도 기준은 모수, 신뢰도, B 수명(분위수) 등 여러 가지가 쓰일 수 있다.

예를 들면, 신뢰도 기준이 분위수, 즉 $t_q(B_{100q}$ 수명)로 규정될 경우 고객들이 $t_q > t_0$ (단, t_0 는 규정된 값으로 미국 자동차 업계는 “bogey 수명”으로 부름)에 대한 실증시험을 요구할 수 있다. 일반적으로 만약 t_q 가 t_0 에 대한 100C% 신뢰구간의 하한이라고 할 때 $t_q > t_0$ 이면, $t_q > t_0$ 는 100C% 신뢰수준에서 성공임을 실증하는 것이 된다. 이와 같은 신뢰성 실증 시험방식이 국내 신뢰성 평가인증 사업의 품목별 신뢰성 시험에 관한 전형적인 시험방법이 되고 있다. 본 논문에서는 이런 시험방식을 $R100(1-q)/C100C$ 로 적는다.

그러나 현업에서 무고장 시험방식을 채택할 경우에 고장이 하나 발생하면 1-고장 허용 방식으로 바꾸어 RDT를 실시하는 경우를 종종 볼 수 있으며, 미국에서도 이 같은 오용을 보고하고 있다 [Sarakakis et al., 2011]. 본 논문에서는 이런 오용을 방지하고 2단계 시험의 장점을 반영하기 위해 수명이 와이불 분포를 따를 때 1 고장까지 허용하는 새로운 2단계 시험방식을 제공하고자 한다.

이런 실증시험에 관한 연구 중에서 1단계에서 실증 여부를 판정하는 시험계획은 Abernethy(2004)과 Wang (1991)에서 자세히 다루고 있으며, 2단계 시험계획으로는 주어진 시험시간 하에서 두 단계의 표본크기를 설정하는 Wang and Lu(1992)과 주어진 표본크기 하에서 두 단계의 시험시간을 설정하는 권영일(2006)의 연구가 있다. 본 논문에서는 후자의 경우이지만 각 단계의 합격확률을 임의로 배정하여 각 단계의 시험시간을 설정하는 권영일(2006)의 방식과는 달리 규정된 신뢰성 목표값하의 기대시험시간을 최소화하는 두 단계의 시험시간을 결정하고자 한다. 또한 RDT는 소비자 위험만 보증하는 1-point 계획인데 반해 소비자와 생산자 위험을 동시에 보증하는 신뢰성 샘플링 검사 계획 중 본 연구의 대상인 2단계 시험계획은 지수분포일 때 Bulgren and Hewett(1973)와 Fairbanks(1988), Raleigh 분포를 따를 때 Aslam(2007)의 연구 등이 있다.

2. 실증시험 방식

2.1 1단계 시험방식

2단계 시험방식과 비교하기 위해 먼저 1단계 시험방

식의 기초이론을 정리한다. 수명이 와이불 분포를 따르는 제품이나 부품의 신뢰도 실증을 위해 $R100(1-q)/C100C$ 시험법은 100q% 백분위수명 B_{100q} 를 주어진 신뢰수준 100C%로 보증하는 시험방식이 된다. 일반적으로 와이불 분포의 형상모수 β 는 대상 제품에 대한 과거자료, 유사제품, 다양한 정보원으로부터 유추할 수 있으므로 RDT에서는 형상모수 값을 알고 있다고 가정한다.

즉, 수명 T 는 형상모수가 β 이고 척도모수가 η 인 와이불 분포(Weibull(β, η))를 따르면 T^β 은 평균이 θ 인 지수분포($\text{Exp}(\theta = \eta^\beta)$)를 따름을 이용한다. 이런 RDT 시험계획 중에서 최소 표본크기 시험계획은 n 개 단위를 t_1 까지 시험하여 만약 고장이 하나도 발생하지 않으면 이 실증시험은 성공하게 된다. 여기서 표본크기 n 또는 시험시간 t_1 는 신뢰수준 C , 신뢰도 R (분위수이면 $q(=1-R)$ 분위수), 그리고 와이불 형상모수 β 에 의존한다.

따라서 RDT는 식 (1)의 가설검정으로 표현할 수 있다.

$$H_0 : B_{100q} = t_0 (\text{또는 } \leq t_0), H_1 : B_{100q} > t_0 \quad (1)$$

식 (1)의 가설검정을 수행하기 위해 표본크기 n 으로 랜덤하게 추출하여 t 동안 시험할 경우 귀무가설 하에서 t 시점의 특정 시험단위의 신뢰도는 다음과 같으며,

$$R(t) = \exp\left[-(t/\eta_0)^\beta\right]$$

$$\text{단, } \eta_0 = t_0 \left[\frac{-1}{\ln(1-q)} \right]^{1/\beta}$$

만약 n 개 중에서 t_1 동안 고장이 하나도 발생하지 않는다면, 식 (1)의 귀무가설 하에서 $N(t_1)$ 가 t_1 까지 고장 개수로 정의될 때 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\Pr(N(t_1) = 0) = \exp\left[-n(t_1/\eta_0)^\beta\right] = 1 - C \quad (2)$$

따라서 필요한 시험시간 t_1 또는 표본크기 n 은 한 쪽이 주어지면 다음과 같은 관계로부터 구할 수 있다.

$$k^\beta = \frac{1}{n} \times \frac{\ln(1-C)}{\ln(1-q)} \quad (3)$$

여기서 $k = t_1/t_0$ 로 bogey 비율로 불린다.

$k > 1$ 인 무고장 실증시험을 실시하는 경우 참값보다 더 작은 β 값을 가지는 경우는 안전하나 (식 (2)의 실증확률이 $1-C$ 보다 작아짐), 만약 규정된 β 값이 참값보다 더 크다면 식 (3)으로부터 설정된 실증시험의 타당

성이 상실될 수 있다. 한편 $k < 1$ 인 최소 표본크기 무고장 시험계획도 가능한데, 이 경우는 참값보다 더 큰 β 값을 가지는 것이 안전하다.

이런 무고장 시험은 실제 B수명이 t_0 보다 상당히 높더라도 가끔 실패할 수도 있다. 즉, 하나 이하의 고장 시험계획(이하 1-고장 허용 시험계획)은 이럴 경우의 무고장 시험의 불합격 확률을 감소시킬 수 있다.

1-고장 허용 시험계획은 신뢰수준 C 일 때 이항분포를 이용한 다음 조건을 만족하도록 t_1 또는 n 가 설정된다.

$$R(t_1)^n + nR(t_1)^{n-1}(1 - R(t_1)) = 1 - C \quad (4)$$

여기서 시험시간의 단축을 위해 가속계수가 AF 인 가속수명시험을 채택한다면 실제 시험시간은 t_1/AF 가 된다.

2.2 2단계 시험방식

본 연구에서 제안되는 고장난 시험단위가 교체되지 않는 비교체 2단계 신뢰성 실증시험 방식은 다음과 같이 수행된다.

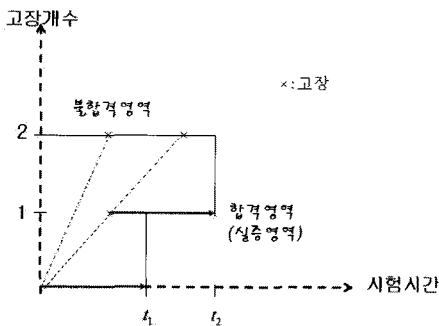
<1단계>

t_1 동안 n 개를 동시에 시험하여 무고장($N(t_1) = 0$)가 합격(즉, 실증)되고 두 개 이상 고장($N(t_1) \geq 2$)이 아니면 불합격되며 한 개 고장($N(t_1) = 1$)이면 2단계로 넘어간다.

<2단계>

t_2 까지 계속 시험하여 더 이상 고장이 나지 않으면 ($N(t_2) = 1$) 합격이고 그렇지 않으면 불합격으로 처리된다.

이에 관한 시험방식이 <그림 1>에 도시되어 있다.



<그림 1> 2단계 시험방식

2.2.1 보수적 고장상황을 적용한 시험계획

Wang and Lu(1992)는 주어진 시험시간 하에서 2단계 $R100(1-q)/C100C$ 시험계획을 만족하는 두 단계의 각 표본크기를 설정하는 방법을 제안하였다. 이 방법은 하나의 고장이 발생한다면 시험 시작 초에 발생한다고 가정하여 두 값을 구하고 있는데, 상기의 2단계 시험계획의 t_1, t_2 를 설정 시 이런 보수적 상황을 적용하고자 한다.

2단계에서 시험 시작 초에 하나의 고장이 발생하고 더 이상 고장이 없다면 t_2 는 식 (5)와 같이 설정될 수 있다.

$$t_2 = t_0 \left[\frac{-\chi_{1-C}^2(4)}{2(n-1)\ln(1-q)} \right]^{1/\beta} \quad (5)$$

단, $\chi_{1-C}^2(\phi)$ 는 자유도 ϕ 인 χ^2 분포의 C 분위수

이 시험의 합격(실증)확률은 1단계에서 $(0, t_1]$ 동안 무고장이거나 1단계의 $(0, t_1]$ 동안 1고장이고 2단계의 $(t_1, t_2]$ 동안 무고장일 경우이므로 식(6)을 만족하도록 t_1 을 설정한다.

$$P_a = R(t_1)^n + nR(t_1)^{n-1}(1 - R(t_1)) = 1 - C \quad (6)$$

이런 2단계 시험방식은 보수적인 접근법이며, 하나의 경험적 방법으로 볼 수 있다.

2.2.2 소비자 위험률을 단계별로 배분한 시험계획

김형의(2006)와 권영일(2006)은 1단계와 2단계의 합격확률(소비자 위험률)의 비율이 주어지면 t_1, t_2 를 설정하는 2단계 시험방식을 제안하였다. 즉, 1과 2단계의 합격비율이 π 와 $1 - \pi$ 일 때 t_1, t_2 는 식 (7)과 (8)로 주어진다 「권영일, 2006」.

$$t_1 = t_0 \left[\frac{\ln(\pi(1-C))}{n\ln(1-q)} \right]^{1/\beta} \quad (7)$$

$$t_2 = t_0 \left[\frac{\ln\left(\frac{(1-\pi)(1-C)}{n(1-R(t_1))}\right)}{(n-1)\ln(1-q)} \right]^{1/\beta} \quad (8)$$

그러나 π 를 설정하는 구체적 지침을 제공하고 있지 않으며, 시험계획의 설계 시 기대시험시간 같은 통계적 척도를 고려하고 있지 않다.

3. 2단계 시험계획의 통계적 설계

$$\text{s.t. } P_a = R(t_1)^n + nR(t_2)^{n-1}(1-R(t_1)) = 1 - C$$

3.1 제 1종 관측중단 경우

본 논문에서는 1단계 시험보다 기대시험시간을 줄일 수 있는 2단계 시험방식의 특성을 고려한 다음의 통계적 설계방법을 적용한다.

2단계가 실시될 확률 P_{s2} 는 다음과 같이 주어지므로 식 (1)의 귀무가설하의 기대시험시간 $E[T_c]$ 는 식 (9)와 같이 된다.

$$E[T_c] = (1 - P_{s2})t_1 + P_{s2}t_2 \tag{9}$$

$$\text{단, } P_{s2} = nR(t_1)^{n-1}(1-R(t_1))$$

따라서 2단계의 시험계획의 설계를 다음과 같은 최적화 문제로 정식화 할 수 있다.

$$\min E[T_c] \tag{10}$$

Maplesoft(2009)의 Maple 14를 이용하여 식 (10)을 최적화하는 t_1, t_2 를 결정하는 프로그램을 작성하여 <표 1>과 같은 2단계 시험계획을 도출하였다. 여기서 두 단계의 시험시간과 기대시험시간은 식 (1)의 귀무가설하의 기준수명 t_0 에 무관하도록 구할 수 있다. <표 1>에는 R90/C90시험계획이 $\beta = 1.0 \sim 3.0$ 과 $n = 3 \sim 30$ 에 대해 정리되어 있는데, 다양한 t_0 에 사용할 수 있도록 표준화한 $k_1 = t_1/t_0$, $k_2 = t_2/t_0$, $E[T_c] = E[T_c/t_0]$ 이 주어져 있다(다른 R100(1-g)/C100C 시험계획은 저자에게 연락하면 제공함). 또한 <표 1>에는 제안된 2단계 시험계획의 1-고장 허용 1단계 시험계획에 대한 기대시험시간의 감소비율(%)도 포함되어 있다. 이를 보면 n 또는 β 가 작을수록 제안된 2단계 시험계획의 기대시험시간에 의한 절감효과가 커짐을 알 수 있다.

<표 1> 2단계 RDT계획: R90/C90-제1종 관측중단

n	$\beta = 1.0$			$\beta = 1.5$			$\beta = 2.0$			$\beta = 2.5$			$\beta = 3.0$		
	k_1	k_2	$E[T_c]$	k_1	k_2	$E[T_c]$	k_1	k_2	$E[T_c]$	k_1	k_2	$E[T_c]$	k_1	k_2	$E[T_c]$
3	9.20	17.62	11.46 (26.0)*	4.31	6.88	5.02 (19.1)	2.97	4.28	3.34 (15.1)	2.38	3.21	2.62 (12.5)	2.06	2.65	2.23 (10.6)
5	5.19	9.72	6.26 (24.8)	2.95	4.63	3.36 (18.1)	2.24	3.18	2.47 (14.3)	1.90	2.53	2.06 (11.8)	1.71	2.17	1.82 (10.0)
10	2.51	4.63	2.96 (24.0)	1.82	2.82	2.05 (17.4)	1.56	2.19	1.70 (13.7)	1.43	1.88	1.53 (11.3)	1.34	1.70	1.42 (9.6)
15	1.66	3.04	1.95 (23.7)	1.38	2.13	1.54 (17.2)	1.27	1.78	1.38 (13.5)	1.21	1.59	1.29 (11.1)	1.17	1.48	1.24 (9.5)
20	1.24	1.27	1.45 (23.6)	1.14	1.75	1.27 (17.1)	1.10	1.54	1.19 (13.4)	1.08	1.41	1.15 (11.0)	1.06	1.34	1.12 (9.4)
30	0.82	1.50	0.96 (23.4)	0.87	1.33	0.96 (17.0)	0.90	1.25	0.97 (13.1)	0.91	1.20	0.97 (11.0)	0.93	1.17	0.98 (9.3)

주)* (1-고장 허용 1단계 계획의 기대시험시간-제안된 2단계 계획의 기대시험시간)/1-고장 허용 1단계 계획의 기대시험시간 $\times 100$ (%)

3.2 혼합 관측중단 경우

본 논문의 대상인 RDT는 연속적으로 모니터링할 경우 합격일 때는 제1종 관측중단이지만 불합격일 때는 제2종 관측중단이 된다. 이런 관측중단 경우를 혼합 관측중단(hybrid censoring)이라 부르며 기대시험시간은 식 (9)보다 작아지지만 보다 복잡한 형태가 된다. n 개 시험표본 중에서 첫 번째와 두 번째의 순서통계량 $T_{(1)}, T_{(2)}$ 의 확률밀도함수는 다음과 같이 주어진다. 특히 $T_{(1)}$ 는 Weibull($\beta, \eta/n^{1/\beta}$)를 따른다.

$$f_{T_{(1)}}(t) = nf(t)R(t)^{n-1}$$

$$f_{T_{(2)}}(t) = n(n-1)f(t)(1-R(t))R(t)^{n-2}$$

단, $f(t) = \frac{\beta}{\eta_0} \left(\frac{t}{\eta_0}\right)^{\beta-1} \exp(-(t/\eta_0)^\beta)$

따라서 혼합 관측중단일 경우 2단계 시험계획에 대한 식 (1)의 쿼리가설하의 기대시험시간은 다음과 같이 주어진다.

$$E[T_c] = P_{a1}t_1 + P_{r1}E[T_{(2)} | T_{(2)} < t_1] + P_{a2}t_2 + P_{r2}E[T_{(2)} | T_{(1)} < t_1, t_1 \leq T_{(2)} < t_2] \quad (11)$$

여기서, $P_{a1} = R(t_1)^n$
 $P_{r1} = 1 - P_{a1} - P_{s2}$ (식 (9) 참고)
 $P_{a2} = nR(t_2)^{n-1}(1 - R(t_1))$
 $P_{r2} = P_{s2} - P_{a2}$

$$E[T_{(2)} | T_{(2)} < t_1] = \int_0^{t_1} \frac{tf_{T_{(2)}}(t)}{\Pr(T_{(2)} < t_1)} dt$$

$$E[T_{(2)} | T_{(1)} < t_1, t_1 \leq T_{(2)} < t_2] = \int_{t_1}^{t_2} \frac{tf_{T_{(2)}}(t)}{\Pr(t_1 \leq T_{(2)} < t_2)} dt$$

3.1절에서 개발된 2단계 시험계획의 혼합 관측중단일 경우에 기대시험시간을 식 (11)로부터 구할 수 있으며, 또한 유사한 접근법으로 식 (11)를 최소화하는 2단계 시험계획도 도출할 수 있다.

4. 적용 예제

수명이 형상모수 $\beta = 2.0$ 인 와이블 분포를 따르는 제품에 대해, $B_{10} = 1,000$ hr을 신뢰수준 90%($C = 0.9$)로 보증하는 R90/C90 시험방식을 설계하는 문제를 고려하자.

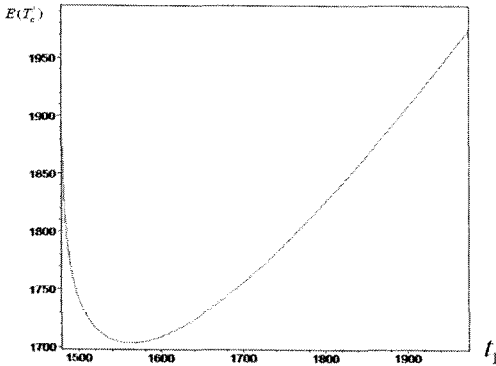
시험단위 수가 10개일 때 두 가지 1 단계 시험계획, 4종의 2단계 시험계획의 시험시간, 두 종의 관측중단 하에서의 기대시험시간(B_{10} 의 참값이 1,000hr일 때)이 <표 2>에 주어져 있다. 특히 본 논문에서 제안된 제1종 관측중단하의 기대시험시간을 최소화하는 2단계 시험계획을 <표 1>에서 구하면 다음과 같이 설정된다.

먼저 $t_1 = 1,560$ hr동안 시험하여 무고장이면 합격(실증)이고 2개 이상 고장일 때 불합격된다. 1단계에서 1개 고장이 발생하면 2단계로 넘어가 $t_2 = 2,190$ hr까지 시험하여 더 고장이 발생하지 않으면 합격이고 고장이 발생하면 불합격이 된다. 이와 같은 2단계 시험계획을 적용하면 제1종 관측중단 하에서 기대시험시간은 1,704hr이 되며, 이 값은 1-고장 허용 1단계 및 2단계 시험계획 중에서 가장 작다. 또한 혼합 관측중단이 적용될 때는 기대시험시간은 1,291hr이 되며, 이 경우의 기대시험시간을 최소화하는 시험계획도 <표 2>의 마지막에 주어져 있다. 그리고 <표 2>을 보면 제안된 시험계획을 포함하여 모든 2단계 시험계획은 1-고장 허용 1단계 시험계획보다 기대시험시간이 감소됨을 알 수 있다. 제안된 3절의 두 시험계획의 최적성을 조사하기 위

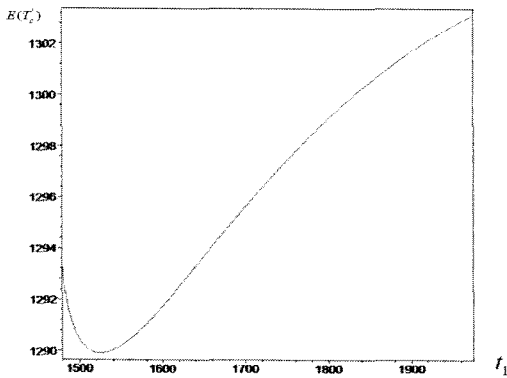
<표 2> RDT계획의 비교: R90/C90, $\beta = 2, n = 10$

계획	k_1	k_2	$E[T_c']$: 제1종 관측중단	$E[T_c']$: 혼합 관측중단
1단계-무고장	1.48	-	1.478	0.836
1단계-1-고장 허용	1.98	-	1.974	1.303
2단계-보수적 설정 (2.2.1절)	1.71	2.03	1.763	1.296
2단계-합격확률배분(2.2.2절): $\pi = 0.6$	1.59	2.14	1.722	1.293
2단계-제안(3.1절): 제1종 관측중단	1.56	2.19	1.704	1.291
2단계-제안(3.2절): 혼합 관측중단	1.52	2.31	1.714	1.290

해 Maple 14로 식 (10)의 제약식에서 t_2 를 t_1 로 치환하여 t_1 에 대해 두 관측중단하의 표준화된 기대시험시간을 도식한 것이 <그림 2>와 <그림 3>이다. 이 그림으로부터 제시된 시험계획이 유일하게 존재함을 확인할 수 있다.



<그림 2> R90/C90 2단계 시험계획의 $E[T_c]$: 제1종 관측중단, $\beta = 2, n = 10$



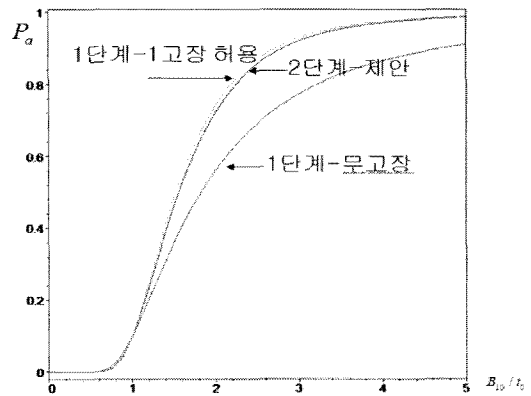
<그림 3> R90/C90 2단계 시험계획의 $E[T_c]$: 혼합 관측중단, $\beta = 2, n = 10$

본 연구의 2단계 시험계획(제1종 관측중단)이 1-고장 허용 1단계 시험계획과 마찬가지로 현업에서 가장 널리 쓰이는 무고장 시험계획보다 대상 예제에서 실증모수의 참값이 B_{10} 일 때 B_{10}/t_0 이 증가함에 따라 합격확률 P_a 이 상당히 높아짐을 <그림 4>에서 파악할 수 있다. 더불어 제시된 시험계획의 합격확률은 하나의 고장을 허용하는 1단계 시험계획과 거의 유사함을 알 수 있다. 한편 2.2절에 소개된 두 종의 다른 2단계 시험계획의 합격확률은 그림의 가독성을 높이기 위해 <그림 4>에 포함시키지 않았지만 제시된 시험계획과 거의 비슷

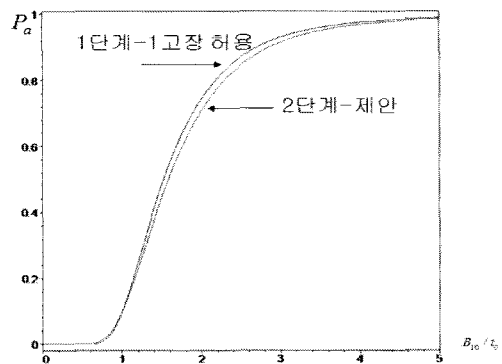
한 양상을 보여준다.

그리고 <그림 5>에는 혼합 관측중단하의 기대시험시간을 최소화하는 2단계 시험계획의 B_{10}/t_0 에 따른 합격확률이 도식되어 있는데 제1종 관측중단의 시험계획보다 약간 떨어짐을 파악할 수 있다.

마지막으로 형상모수를 안다고 가정하고 있으므로 이에 대한 불확실성이 존재할 때, 즉, β 에 대해 구간범위가 주어질 때 제시된 2단계 시험계획의 특성을 조사해 보자. 대상 예제에서 β 가 1.6~2.4로 주어질 때 제1종 관측중단하의 2단계 시험계획이 <표 3>에 정리되어 있다.



<그림 4> R90/C90 2단계 시험계획의 합격확률: 제1종 관측중단, $\beta = 2, n = 10$



<그림 5> R90/C90 2단계 시험계획의 합격확률: 혼합 관측중단, $\beta = 2, n = 10$

1단계 시험방식과 마찬가지로 β 가 커지면 두 단계의 시험시간과 B_{10} 의 참값이 1,000hr일 때의 기대시험시간이 감소되고 있다. 또한 참 β 가 1.6~2.4로 주어질 경우 β 를 2로 오추정할 때($\hat{\beta}=2$) 표준화된 기대시험시간

<표 3> β 의 추정범위에 따른 제안된 2단계 시험계획(제1종 관측중단)의 민감도분석: R90/C90, $\beta = 2$, $n = 10$

β	k_1	k_2	$E(T'_c)$		$E(T'_c \tilde{\beta})$		$\tilde{\beta}$ 일 때 $1 - C$
			제1종 관측중단	혼합 관측중단	제1종 관측중단	혼합 관측중단	
1.6	1.75	2.65	1.953	1.400	1.899	1.316	0.043
1.8	1.64	2.39	1.810	1.337	1.786	1.304	0.069
2.0	1.56	2.20	1.704	1.291	1.704	1.291	0.100
2.2	1.50	2.05	1.622	1.255	1.636	1.275	0.134
2.4	1.45	1.93	1.557	1.227	1.579	1.260	0.168

$E(T'_c | \tilde{\beta})$ 과 $1 - C$ 도 포함되어 있다. 이를 고려하면 1 단계 시험계획과 마찬가지로 본 상황에서는 가장 작은 형상모수로 시험계획을 설정하는 것이 타당함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 설계와 양산단계에서 신뢰성 평가나 보증을 위해 널리 사용되는 무고장 신뢰성 실증방식보다 합격(실증)확률 측면에서 우수하면서 기대시험시간을 줄일 수 있는 새로운 2단계 시험계획을 제시하였다. 규정된 백분위 수명을 특정 신뢰수준으로 보증하는 시험방식에서 제1종 관측중단일 경우 규정된 신뢰성 목표값(여기서는 분위수)하의 기대시험시간을 최소화하는 시험계획을 설계하는 방법을 제안하고 도출된 시험계획의 일부분을 시험자가 활용할 수 있도록 표로서 제공하였다. 또한 연속적으로 모니터링하는 경우는 혼합 관측중단이 되므로 이런 관측중단 하에서의 시험계획도 통계적으로 설계하는 방법을 제시하였다.

또한 제시된 2단계 시험계획을 기존의 두 가지 1단계 시험계획과 두 종의 2단계 시험계획을 예제를 통해 비교하여 제시된 2단계 시험계획의 우수성을 입증하였다. 더불어 알려져 있다고 가정하고 있는 와이블 분포의 형상모수 값에 대한 민감도분석을 실시하여 제안된 시험계획의 특성도 조사하였다.

따라서 본 논문의 결과는 우리나라 신뢰성 규격의 표준 시험계획으로 채택되고 있는 무고장 시험방식의 대안으로 널리 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 권영일(2006), “기계류부품 신뢰성보증을 위한 2단계 시험방식 설계”, 「한국품질경영학회지」, 제34권 제1호, pp. 20-26.
- [2] 김형의(2006), “한국적 신뢰성 인증체계 개념”, 「신뢰성응용연구」, 제6권 1호, pp. 63-91.
- [3] Abernethy R. B.(2004), *The New Weibull Handbook*, 5th ed., Published by R. B. Abernethy, 536 Oyster Road, North Palm Beach, FL33408-4328, USA.
- [4] Aslam, M.(2007), “Double Acceptance Sampling Based on Truncated Life Tests in Rayleigh Distribution,” *European Journal of Scientific Research*, Vol. 17, pp. 605-610.
- [5] Bulgren W. G. and Hewett, J. E.(1973), “Double Sample Tests for Hypotheses about the Mean of an Exponential Distribution,” *Technometrics*, Vol. 15, pp. pp. 187-190.
- [6] Fairbanks, K.(1988), “A Two-Stage Life Test for the Exponential Parameter,” *Technometrics*, Vol. 30, pp. 175-180.
- [7] Maplesoft(2009), *Maple™ 14*, Maplesoft, Canada.
- [8] Sarakakis, G., Gerokostopoulos, A. and Mettas, A.(2011), “Special Topics for Consideration in a Design for Reliability Process,” *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS) Proceedings*, pp. 1-6.
- [9] Wang, C. J.(1991), “Sample Size Determination of Bogey Tests Without Failures,” *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 7, pp. 35-38.
- [10] Wang, C. J. and Lu, M. W.(1992), “A Two-Stage Sampling Plan for Bogey Tests,” *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 8, pp. 29-35.