

☒ 연구논문

Min-Max 방법을 적용한 4:2:1 절충적 계획 4:2:1 compromise plans using Min-Max method

최 재 혁*

Choi, Jae Hyuk

강 창 욱**

Kang, Chang Wook

Abstract

Testing high reliability devices under normal operating condition is difficult, because the devices are not likely to fail in the relatively short time available for tests. For most applications it is necessary to accelerate the causes of failure by increasing a stress above its normal value.

Previous accelerated life test(ALT) plans have shown how to find optimum allocation, lowest stress and sample size subject to minimizing the variance of mean life estimator.

In these ALT plans, the highest acceptable test-stress was assumed to be specified in advance by the experimenter but there is no guidance for selecting it. This assumption is, however, inappropriate for many applications. Testing devices at too-high stress levels can invalidate the extrapolation model, or introduce failure mechanisms that are not anticipated under normal operating conditions.

In this paper, we propose new 4:2:1 compromise plans using Min-Max method to minimize this risk and present minimized test-stress levels(max, middle, min), and find sample allocation based on Min-Max 4:2:1 compromise plans.

In result, we compare previous 4:2:1 compromise plans specified maximum test-stress with Min-Max 4:2:1 compromise plans minimized maximum test-stress.

1. 서론

‘가속수명시험’이란 정상시보다 더 열악한 조건에서 시험을 하여 제품의 수명을 단축시키거나, 성능을 급속히 저하시키는 등의 다양한 시험방법을 말한다. 이러한 가속수명시험의 목적은 짧은 기간에 자료를 얻은 후 적절한 분석절차를 통하여 정상상태에서의 제품의 수명이나 성능을 추정하는 데 있다. 따라서 이와 같은 가속수명시험을 통하여 시험시간과 비용을 감소시킬 수 있으며, 여기서 얻어진 결과는 구성부품이나 하위시스템의 신뢰도를 평가하거나, 고장 모드(failure modes)를 조사하고, 다른 제조업체와의 비교 등을 위해 이용된다.

이러한 가속수명시험의 실시에 앞서 적절한 시험계획(test plan)을 세우게 되는데 효율성이나 비용의 측면에서 효과적인 시험계획이 요구된다. 그런데 기존의 가속수명시험에 대한 연구는 대부분 최대 시험스트레스를 설정하는 경우에 명확한 기준 대신, 실험자의 경험에

* 한양대학교 대학원 산업공학과

** 한양대학교 산업공학과 교수

의한 판단이나 또는 이전에 동종의 제품을 가지고 실험해서 얻은 유사한 값들을 사용하여 최대 시험스트레스가 사전에 명시되어 있다고 가정하고 시험계획을 실시하였다. 그러나 만약 명시된 최대 시험스트레스가 불필요하게 높게 설정된 경우, 이러한 최대 시험스트레스를 가지고 외삽(extrapolating)에 의해 정상상태에서의 제품의 수명을 추정하게 되면 실제와 큰 차이가 있는 값을 얻게 되는 오류를 범하게 된다.

따라서 이와 같은 오류를 줄이기 위해 최대 시험스트레스를 명시된 값으로 가정하지 않고 일정한 범위내에서 최소화하여 4:2:1 절충적 계획에 적용한 Min-Max 4:2:1 절충적 시험계획이 필요하다.

2. Min-Max 4:2:1 절충적 계획

2.1 모델과 기본 가정

본 장에서 사용되는 기호들을 다음과 같이 정의하기로 한다.

γ_0 : 수명-스트레스 선형관계식에서의 절편(intercept)

γ_1 : 수명-스트레스 선형관계식에서의 기울기(slope)

$\hat{\gamma}_0$: γ_0 의 추정량

$\hat{\gamma}_1$: γ_1 의 추정량

τ : 중도절단시간

η : $\log(\tau)$

a : 표준화된 중도절단시간(standardized censoring time)

b : 표준화된 기울기(standardized slope)

a^* : a 의 최적값

b^* : b 의 최적값

μ : 수명분포의 위치 모수(location parameter)

σ : 수명분포의 척도 모수(scale parameter)

σ' : σ 의 추정량

μ_D : x_D 에서의 평균수명

μ_D' : μ_D 의 추정량

μ_{req} : 평균 요구수명(required mean life)

$\hat{\mu}_D$: μ_D 의 최우추정량

P : 백분위수

p_D : x_D 에서 중도절단시간까지 제품이 고장날 확률

p_H : x_H 에서 중도절단시간까지 제품이 고장날 확률

LCB : lower confidence bound

$\Phi(\cdot)$: 표준 정규누적분포함수

최대 시험스트레스를 최소화하기 위해 사용되는 모델과 기본가정은 다음과 같으며, 이 모델을 통해 나온 결과는 최우추정법을 사용하여 정상상태에서의 수명분포로 외삽된다.

- 1) 임의의 스트레스 수준에서 시험대상물의 수명 t 는 대수정규 분포를 따른다.
- 2) 대수수명의 표준편차 σ 는 상수이다.
- 3) 평균대수수명은 스트레스 x 의 선형함수이다.

$$\mu(x) = \gamma_0 + \gamma_1 x$$

여기서 γ_0, γ_1 및 σ 는 자료로부터 추정된 모수이며,

x 는 $\frac{1000}{T}$ 이다. (T 는 절대온도)

4) 시험대상물의 수명 t 는 통계적으로 독립이다.

2.2 Min-Max 방법의 이론

설계 스트레스 x_D 에서 최우추정량 $\widehat{\mu}_D$ 의 표준편차 $\sigma(\widehat{\mu}_D)$ 를 최소화하기 위해서 최대 시험스트레스 x_H 는 가능한 한 높게 설정되어야 한다. 그러나 최대 시험스트레스는 가정된 모형이 설계 스트레스와 시험 스트레스의 전 범위에서 유효하도록, 또한 설계 스트레스에서 발생하지 않는 다른 고장원인이 발생하지 않도록 설정되어야 한다. 만약 다른 조건들이 일정할 때 최대 시험스트레스 x_H 가 감소하게 되면 최우추정량 $\widehat{\mu}_D$ 의 표준편차 $\sigma(\widehat{\mu}_D)$ 는 점점 증가하게 된다 [8] 그런데 μ 의 신뢰구간은 $\widehat{\mu} \pm t(n-1, \alpha/2) \cdot \sigma(\widehat{\mu})$ 이므로 x_H 가 감소하면 $\widehat{\mu}_D$ 에 대한 신뢰구간은 커지게 된다. 그러므로 일정한 신뢰구간을 만족하는 범위 내에서 x_H 를 최소화하는 방법을 찾는다. 즉 $\mu_D > \mu_{req}$ 를 만족하는 최소의 x_H 를 구한다.

설계 스트레스 x_D 에서의 평균수명 μ_D 가 μ_{req} 를 넘는다는 것은 μ_D 의 LCB(lower confidence bound)가 시험자가 원하는 일정한 신뢰수준 $(1-q)$, q 는 유의수준, 으로 μ_{req} 보다 커야한다는 것이다. 따라서 이 조건을 만족시키는 식은 다음과 같다.

$$LCB(\widehat{\mu}_D) = \widehat{\mu}_D - c_1 \sigma(\widehat{\mu}_D) > \mu_{req} \tag{2.1}$$

최우추정량은 실제 상황과 유사한 조건하에서 최량 점근 정규추정량 (BAN : best asymptotically normal), 즉 최우추정량의 샘플링분포의 누적확률분포가 충분한 크기의 고장 하에서 평균이 추정량과 일치하게 되는 정규분포의 누적확률분포로 접근하게 된다. 한편 표본의 크기가 충분히 크지 못한 경우에도 최우추정량은 항상 좋은 추정량의 특성을 갖는다. 이와 같은 성질을 최우추정량의 점근 성질(asymptotic property) 이라고 한다 [8]

이와 같은 점근 성질에 의해 $\widehat{\mu}_D$ 는 근사적으로 정규분포를 따르게 되므로 식 (2.1) 에서 $c_1 = z_q$ 이 된다. 따라서 식 (2.1) 을 고쳐 쓰면 다음과 같다.

$$LCB(\widehat{\mu}_D) = \widehat{\mu}_D - z_q \sigma(\widehat{\mu}_D) > \mu_{req} \tag{2.2}$$

또한 식 (2.2) 는 다음과 같은 가설검정으로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$H_0 : \mu_D < \mu_{req}$$

$$H_1 : \mu_D \geq \mu_{req}$$

제품이 만족할 만한 신뢰도를 가지고 있다는 것을 증명하려면 위의 귀무가설 H_0 를 확률 $(1-p)$ 로 기각해야 한다. 따라서 귀무가설이 기각되면 $\widehat{\mu}_D$ 의 신뢰구간은 다음과 같이 된다.

$$[\mu_D' - c_2 \sigma(\widehat{\mu}_D), \infty] \tag{2.3}$$

위의 식 (2.3) 을 고쳐 쓰면 다음과 같다.

$$\widehat{\mu}_D > \mu_D' - c_2 \sigma(\widehat{\mu}_D) \tag{2.4}$$

또한 식 (2.2) 와 마찬가지로 점근 성질에 의해 $\widehat{\mu}_D$ 가 근사적으로 정규분포를 따르므로

$c_2 = z_p$ 이 성립한다. 따라서 식 (2.4) 은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\widehat{\mu}_D > \mu_D' - z_p \sigma(\widehat{\mu}_D) \quad (2.5)$$

그러므로 식 (2.2) 와 식 (2.5) 를 함께 쓰면 다음과 같다.

$$\mu_D' - (z_q + z_p) \sigma(\widehat{\mu}_D) > \mu_{req} \quad (2.6)$$

이것을 정리하면

$$\sigma(\widehat{\mu}_D) < (\mu_D' - \mu_{req}) / (z_q + z_p) \quad (2.7)$$

이고, 따라서

$$Var(\widehat{\mu}_D) < ((\mu_D' - \mu_{req}) / (z_q + z_p))^2 \quad (2.8)$$

이 된다.

여기서 $Var(\widehat{\mu}_D)$ 의 최대값을

$$k = ((\mu_D' - \mu_{req}) / (z_q + z_p))^2 \quad (2.9)$$

라고 하면

$Var(\widehat{\mu}_D) < k$ 이 된다.

Kielpinski & Nelson [7] 과 Meeker & Nelson [14] 은 제품의 수명이 각각 lognormal 분포와 Weibull 분포를 따르는 경우에 분산 인자를 구하기 위한 그래프를 제시하였다. 이 그래프의 특징은 다음과 같다.

- (1) 분산 $Var(\widehat{\mu}_D)$ 을 표현할 때 x_L 과 x_H 의 함수로 나타내지 않고, 가정된 모델과 그 파라미터들 η , μ_H' , μ_0' , σ' 로부터 유도된 a 와 b 의 함수로 나타낸다.

여기서 a 와 b 를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$a = (\eta - \mu_H') / \sigma' \quad (2.10)$$

$$b = (\mu_D' - \mu_H') / \sigma' \quad (2.11)$$

이 때 μ_H' 는 x_H 의 값에 따라 변하므로 고정된 값이 아닌 변수로 생각하고, b 를 a 의 함수로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$b(a) = a + (\mu_D' - \eta) / \sigma' \quad (2.12)$$

- (2) $Var(\widehat{\mu}_D)$ 대신 분산 인자 V 를 y 축으로 사용하여 나타낸다.

n 개의 샘플을 가지는 시험계획에서 $\widehat{\mu}_D$ 의 분산은 다음과 같다.

$$Var(\widehat{\mu}_D) = \sigma'^2 V / n \quad (2.13)$$

위의 식 (2.13) 과 식 (2.9) 을 함께 쓰면 다음과 같다.

$$V = nk / \sigma'^2 \quad (2.14)$$

따라서 식 (2.14) 의 값은 Kielpinski & Nelson [7] 가 제시한 그래프에서 나타낼 수 있다.

2.3 Min-Max 4:2:1 절충적 계획 설계

최대 시험스트레스를 명시된 값이 아닌 일정한 신뢰수준내에서 최소화하여 4:2:1 절충적 계획에 적용시킨 Min-Min 4:2:1 절충적 계획은 다음과 같은 단계를 통해 설계된다.

[단계 1]

식 (2.9) 과 식 (2.14) 을 가지고 분산 인자 V 의 값을 구한다.

위에서 구한 V 의 값에 대해 Kielpinski & Nelson [7] 이 제시한 분산 인자 그래프에서 x 축과 평행하게 직선을 그린다.

[단계 2]

변화하는 x_H 의 값에 따라 $a, b(a)$ 의 값을 분산 인자 그래프에 그린다.

식 (2.12) 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$b(a) = a + \delta \tag{2.15}$$

여기서 δ 는 η, μ_0', σ' 를 가지고 구한다.

[단계 3]

[단계 1] 에서 그린 직선과 [단계 2] 에서 구한 값이 교차하는 점에서 a^* 와 b^* 의 값을 구한다.

[단계 4]

[단계 3] 에서 구한 a^* 를 식 (2.10) 에 대입하여 μ_H^* 을 구하고 μ_H^* 의 값을 가지고 x_H^* 를 구한다.

식 (2.10) 를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\mu_H^* = \eta - \sigma a^* \tag{2.16}$$

또한

$$\mu_H^* = \hat{\gamma}_0 + \hat{\gamma}_1 x_H^* \tag{2.17}$$

이 성립하므로, 위의 두 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_H^* = (\eta - \sigma a^* - \hat{\gamma}_0) / \hat{\gamma}_1 \tag{2.18}$$

[단계 5]

최소 시험스트레스 x_L^* 과 중간 시험스트레스 x_M^* 을 구하기 위해 [단계 3] 에서 구한 a^*, b^* 를 이용하여 설계 스트레스 x_D 에서 중도절단시간 τ 까지 고장날 확률 p_D^* 와 최소화된 최대 시험스트레스 x_H^* 에서 고장날 확률 p_H^* 의 값을 구한다.

식 (2.10) 과 식 (2.11) 을 이용하여 p_D^* 를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$p_D^* = \Phi(a^* - b^*) \tag{2.19}$$

식 (2.10) 을 이용하여 p_H^* 를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$p_H^* = \Phi(a^*) \tag{2.20}$$

[단계 6]

[단계 5] 에서 구한 p_D^* 와 p_H^* 에 대해 Meeker-Hahn [5] 이 제시한 표에서 표준화된 최소 스트레스조건 x_L' 과 표준화된 중간 스트레스 조건 x_M' 을 구한다.

[단계 7]

[단계 6] 에서 구한 x_L' 을 이용하여 최소 시험스트레스 x_L^* 을 구한다. 최소 시험스트레스 x_L^* 을 구하는 식은 다음과 같다.

$$x_L^* = x_D + x_L'(x_H^* - x_D) \tag{2.21}$$

[단계 8]

[단계 6] 에서 구한 x_M' 을 이용하여 중간 시험스트레스 x_M^* 을 구한다. 중간 시험스트레스 x_M^* 을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$x_M^* = x_D + x_M'(x_H^* - x_D) \tag{2.22}$$

위의 [단계 7] 과 [단계 8] 에서 보는 바와 같이 최소 시험스트레스 x_L^* 와 중간 시험스트레스 x_M^* 은 각각 최대 시험스트레스 x_H^* 의 값에 따라 변화하며, x_H^* 에 비례하는 것을 알 수

있다. 그런데 본 연구에서는 Min-Max 방법을 이용하여 제한된 범위내에서 최소화된 최대 시험스트레스를 구하였으므로 이 값을 이용하여 최소화된 중간 시험스트레스와 최소 시험스트레스의 값을 얻을 수 있다.

[단계 9]

Min-Max 4:2:1 절충적 계획을 설계하는 것이므로, n 개의 샘플에 대해 각 스트레스 수준 x_L, x_M, x_H 에 각각 $4n/7, 2n/7, n/7$ 의 비율로 표본을 할당한다.

3. 수치 예제

다음의 [표 1] 은 전기모터에 들어가는 Class-B 절연체(Insulation)의 성능을 평가하기 위해 가속수명시험을 하여 얻은 절연체의 수명자료 이다. 스트레스는 온도가 사용되었고 스트레스 수준은 150℃, 170℃, 190℃, 220℃ 등 4 개의 수준이 있다. 중도절단시간은 8,064 시간이며 각 스트레스 수준에 대해 10 개씩 모두 40 개의 샘플이 시험되었다. 이 시험의 목적은 설계 스트레스 130℃ 에서 절연체의 중위수명이 20,000 시간 이상인지 여부를 판단하는 것이다. 신뢰수준은 95% 로 가정한다. 다음은 본 예제에 대한 데이터를 나타낸 것이다.

[표 1] Class-B 절연체 수명자료 (Crawford 1970)

150℃	8064+	8064+	8064+	8064+	8064+	8064+	8064+	8064+	8064+	8064+
170℃	1764	2772	3444	3542	3780	4860	5196	5448+	5448+	5448+
190℃	408	408	1344	1344	1440	1680+	1680+	1680+	1680+	1680+
220℃	408	408	504	504	504	528+	528+	528+	528+	528+

(단위 : 시간, + : 가동중)

이 실험은 스트레스로 온도를 사용하였으므로 아레니우스-대수정규 모형으로 가정하고 모델을 세우면 다음 식 (3.1) 과 같다.

$$\mu(x) = \gamma_0 + \gamma_1 x \tag{3.1}$$

여기서 스트레스 x 는 $\frac{1000}{T}$ 이고, T 는 절대온도이다.

자료분석을 위해 SAS 프로그램의 LIFEREG procedure를 이용하여 추정량을 구한 결과는 다음과 같다.

$$\hat{\gamma}_0 = -6.013, \hat{\gamma}_1 = 4.308, \sigma' = 0.259, \sigma'^2 = 0.067$$

3.1 Min-Max 4:2:1 절충적 계획 설계

이 절에서는 앞서 살펴본 예제를 Min-Max 방법에 적용시켜 최대 시험스트레스를 최소화한 Min-Max 4:2:1 절충적 계획을 설계하도록 한다. 먼저 분석에 필요한 값들을 정리하면 다음의 [표 2] 와 같다.

[표 2] Summary of parameters

parameters	value	parameters	value
n	40	μ_{req}	4.301
τ	8064	$\mu_{D'}$	4.671
η	3.907	z_q	1.645
x_D	2.480	z_p	1.645

식 (2.14) 에서 제시한 분산 인자 V 의 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

먼저 식 (2.9) 에서 $Var(\widehat{\mu}_D)$ 의 최대값 k 의 값을 구하면

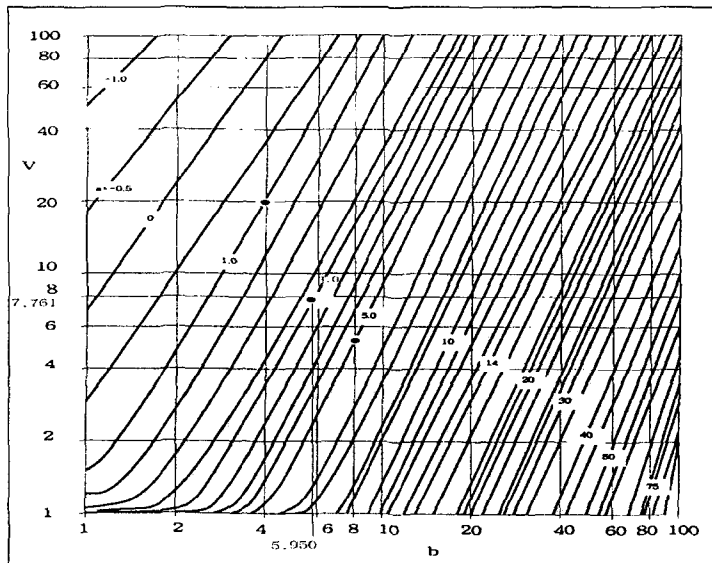
$$k = ((\mu_{D'} - \mu_{req}) / (z_\alpha + z_\beta))^2$$

$$= ((4.671 - 4.301) / (1.645 + 1.645))^2 = 0.013$$

이므로 이 값을 식 (2.14) 에 대입하면

$$V = nk / \sigma'^2 = (40 \times 0.013) / 0.067 = 7.761 \text{ 이 된다.}$$

또한 식 (2.15) 에서 $\delta = \frac{(\mu_{D'} - \eta)}{\sigma'} = \frac{(4.671 - 3.907)}{0.259} = 2.949$ 이므로,



[그림 2] 최적의 a^* , b^*

a^* 와 b^* 의 값을 구하기 위해 $a=t, b(a)=t+2.949$ 라 놓고 [그림 2] 의 분산 인자 그래프에서 이 조건을 만족하는 값을 찾으면 그림에서와 같이 3 개의 점으로 나타낼 수 있다. 이들 3 개의 점과 분산 인자 $V=7.761$ 가 교차하는 점의 값을 구하면 $a^*=3, b^*=5.950$ 가 된다.

따라서 계산된 $\eta, \sigma', a^*, \widehat{\gamma}_0$ 등을 이용하여 식 (2.18) 에서 최소화된 최대 시험스트레스 수준 x_H^* 을 구하면

$$x_H^* = (\eta - \sigma' a^* - \widehat{\gamma}_0) / \widehat{\gamma}_1$$

$$= (3.907 - 0.259 \times 3 + 6.013) / 4.308 = 2.122$$

의 값을 얻을 수 있다.

또한 최소 시험스트레스 x_L^* 과 중간 시험스트레스 x_M^* 을 구하기 위해 식 (2.19) 과 식 (2.20) 에서 a^*, b^* 를 이용하여 x_D 에서 중도절단시간 τ 까지 고장날 확률 p_D^* 와 x_H^* 에서 고장날 확률 p_H^* 의 값을 구하면 다음과 같다.

$$p_D^* = \Phi(a^* - b^*) = \Phi(3 - 5.950) = \Phi(-2.950) = 0.001589$$

$$\approx 0.001$$

$$p_H^* = \Phi(a^*) = \Phi(3) = 0.99865$$

$$\approx 1$$

위에서 구한 $p_D^*=0.001$ 과 $p_H^*=1$ 에 대해 Meeker-Hahn [5] 이 제시한 표에서 표준화된 최소 스트레스조건 x_L' 과 표준화된 중간 스트레스조건 x_M' 을 구하면 $x_L'=0.324$ 이고 $x_M'=0.662$ 이다.

따라서 이 값을 식(2.21) 과 식(2.22) 에 대입하면 각각

$$\begin{aligned} x_L^* &= x_D + x_L'(x_H^* - x_D) \\ &= 2.480 + 0.324(2.122 - 2.480) = 2.364 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_M^* &= x_D + x_M'(x_H^* - x_D) \\ &= 2.480 + 0.662(2.122 - 2.480) = 2.243 \end{aligned}$$

이다.

그리고 본 예제의 가정에서와 같이 $x = \frac{1000}{T}$ (T 는 절대온도) 이므로 다음의 관계식에서 최소화된 최대 시험온도 T_H^* 와 중간 시험온도 T_M^* , 그리고 최소 시험온도 T_L^* 를 각각 구할 수 있다.

$$T_H^* = \frac{1000}{x_H^*} - 273.2 \approx 198 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$T_M^* = \frac{1000}{x_M^*} - 273.2 \approx 172 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

$$T_L^* = \frac{1000}{x_L^*} - 273.2 \approx 149 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

또한 본 시험계획은 Min-Max 4:2:1 절충적 계획이므로 각 스트레스 수준에서의 표본의 할당은 $n_L=4n/7$, $n_M=2n/7$, $n_H=n/7$ 의 비율로 한다. 즉 각각 $n_L=23$, $n_M=11$, $n_H=6$ 개의 샘플을 할당한다.

3.2 결과 분석

이 장에서는 최대 시험스트레스를 동일한 신뢰수준하에서 최소화 시킨 Min-Max 4:2:1 절충적 계획의 각 시험스트레스 수준과 각각의 수준에서의 샘플의 할당을 구해 보았다.

본 논문에서 제시한 바와 같이 최대 시험스트레스를 최소화시킨 Min-Max 4:2:1 절충적 계획과 최대 시험스트레스가 명시되어 있는 기존의 4:2:1 절충적 계획을 비교한 결과가 [표 3] 에 나타나 있다.

[표 3] 시험계획간의 비교

기존의 4:2:1 절충적 계획		Min-Max 4:2:1 절충적 계획		온도 차이
T_L	155 $^\circ\text{C}$	T_L^*	149 $^\circ\text{C}$	6 $^\circ\text{C}$
T_M	185 $^\circ\text{C}$	T_M^*	172 $^\circ\text{C}$	13 $^\circ\text{C}$
T_H	220 $^\circ\text{C}$	T_H^*	198 $^\circ\text{C}$	22 $^\circ\text{C}$

[표 3] 에서 보는 바와 같이 최대 시험스트레스가 명시되어 있는 기존의 4:2:1 절충적 계획과 최대 시험스트레스를 일정한 신뢰수준 내에서 최소화시켜 구한 Min-Max 4:2:1 절충적 계획을 비교한 결과, 최대 시험온도가 각각 220℃와 198℃로서 약 22℃의 차이를 보이고 있으며, 최소 시험온도는 각각 155℃와 149℃로 약 6℃의 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 신뢰수준을 모두 동일하게 95%로 가정하였을 경우, Min-Max 4:2:1 절충적 계획은 기존의 4:2:1 절충적 계획보다 더 낮은 스트레스 수준에서 실험을 하고 절연체의 중위수명이 20,000 시간 이상임을 입증할 수 있으므로 더 효과적이라고 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 중도절단자료를 가지고 있는 가속수명시험(ALT) 에서 Min-Max 4:2:1 절충적 계획을 설계하는 것을 보였다.

기존의 가속수명시험에 대한 연구는 대부분 최대 시험스트레스를 설정하는 경우에 명확한 기준 대신, 실험자의 경험에 의한 판단이나 또는 이전에 동종의 제품을 가지고 실험해서 얻은 유사한 값들을 사용하여 최대 시험스트레스가 사전에 명시되어 있다고 가정하고 시험계획을 실시하였으므로 명시된 최대 시험스트레스가 불필요하게 높게 설정된 경우, 외삽에 의해 정상상태에서의 제품의 수명을 추정하게 되면 실제와 큰 차이가 있는 값을 얻게 되는 오류를 범하게 된다.

따라서 본 논문에서는 이와 같은 오류를 줄이기 위해 최대 시험스트레스를 명시된 값이 아니고 동일한 신뢰수준하에서 최소화하는 Min-Max 방법을 이용하여 4:2:1 절충적 계획에 적용한 새로운 4:2:1 절충적 시험계획을 제시하였다.

수치 예제에서는 Min-Max 4:2:1 절충적 계획이 최대 시험스트레스가 명시되어 있는 기존의 4:2:1 절충적 계획에서 설계한 시험스트레스 수준보다 더 낮은 스트레스 수준을 구할 수 있음을 보였다. 이와 같이 시험스트레스 수준(온도)을 낮추어 실험함으로써 시험비용의 절감도 기대할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Meeter, C. A., and Meeker, W. Q., "Optimum Accelerated Life Tests With a Nonconstant Scale Parameter," *Technometrics*, Vol. 36, No. 1, 1994, pp. 71-83.
- [2] Escobar, L. A., and Meeker, W. Q., "Planning Accelerated Life Tests With Two or More Experimental Factors," *Technometrics*, Vol. 37, No. 4, 1995, pp. 411-427.
- [3] Hahn, G. J., and Nelson, W., "A Comparison of Methods for Analyzing Censored Life Data to Estimate Relationships Between Stress and Product Life," *IEEE Trans. on Reliability*, Vol. R-23, No. 1, 1974, pp. 2-11.
- [4] Yang, G. B., "Optimum Constant-Stress Accelerated Life-Test Plans," *IEEE Trans. on Reliability*, Vol. 43, No. 4, 1994, pp. 575-581.
- [5] Meeker, W. Q., and Hahn, G. J., "How to Plan an Accelerated Life Test-Some Practical Guidelines," *ASQC Basic Reference in Quality Control:Statistical Techniques*, Vol. 10, 1985, pp. 1-33.
- [6] Barton, R. R., "Optimal Accelerated Life-Time Plans that Minimize the Maximum Test-Stress," *IEEE Trans. on Reliability*, Vol. 40, No. 2, 1991, pp. 166-172.

- [7] Kielpinski, T. J., and Nelson, W., "Optimum Censored Accelerated Life Tests for Normal and Lognormal Life Distributions," *IEEE Trans. on Reliability*, Vol. R-24, No. 5, 1975, pp. 310-320.
- [8] Nelson, W., *Accelerated Testing-Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses*, John Wiley & Sons, 1990.
- [9] Nelson, W., and Kielpinski, T. J., "Theory for Optimum Censored Accelerated Life Tests for Normal and Lognormal Life Distributions," *Technometrics*, Vol. 18, No. 1, 1975, pp. 105-114.
- [10] Nelson, W., and Meeker, W. Q., "Theory for Optimum Accelerated Censored Life Tests for Weibull and Extreme Value Distributions," *Technometrics*, Vol. 20, No. 2, 1978, pp. 171-177.
- [11] Meeker, W. Q., "A Comparison of Accelerated Life Test Plans for Weibull and Lognormal Distributions and Type 1 Censoring," *Technometrics*, Vol. 26, No. 2, 1984, pp. 157-171.
- [12] Meeker, W. Q., and Hahn, G. J., "A Comparison of Accelerated Test Plans to Estimate the Survival Probability at a Design Stress," *Technometrics*, Vol. 20, No. 3, 1978, pp. 245-247.
- [13] Meeker, W. Q., and Escobar, L. A., "A Review of Recent Research and Current Issue in Accelerated Testing," *International Statistical Review*, Vol. 61, No. 1, 1993, pp. 147-168.
- [14] Meeker, W. Q., and Nelson, W., "Optimum Accelerated Censored Life Tests for Weibull and Extreme Value Distributions," *IEEE Trans. on Reliability*, Vol. R-24, No. 5, 1975, pp. 321-332.