

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.6.743

시스템 신뢰성 향상을 위한 확률적 부하경감설계[§]

손 영 갑^{**}

* 안동대학교 기계자동차공학과

Derating Design for Improving System Reliability by Using a Probabilistic Approach

Young Kap Son^{**}

* Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Andong Nat'l Univ.

(Received January 5, 2010 ; Revised April 22, 2010 ; Accepted April 22, 2010)

Key Words: Derating Design(부하경감설계), Probabilistic(확률적), System Level(시스템 수준), Variation in Stress(스트레스 변량)

초록: 본 논문은 시스템 신뢰성 향상을 위한 확률적 접근을 이용한 부하경감설계방법을 제안한다. 제안하는 설계방법은 부품 수준이 아닌 시스템 수준에서 온도와 전류와 같은 스트레스의 경감 수준을 선정하는 것이다. 직렬 시스템의 신뢰도 모델을 이용하여, 스트레스와 시간의 함수로 주어진 부품들의 신뢰도값들을 이용하여 시스템 신뢰도를 평가한다. 기존의 부하경감설계에서는 고려되지 않았지만, 본 연구에서는 환경 및 동작 조건에서 시스템이 받게 되는 스트레스의 변량을 고려하였다. 시스템 신뢰도 향상을 위한 최적화 문제를 정의하고, FORM을 적용하여 해를 구함으로써 최적의 부하경감설계를 수행하였다. 전기 시스템에 대한 설계를 통하여 제안한 설계방법에 대한 자세한 설명과 응용가능성을 제시하였다.

Abstract: This paper proposes a derating design method for improving system reliability by using a probabilistic approach. In the proposed design, the focus is upon system levels in determining derated levels of stresses such as temperature and current, unlike recent design approaches that focus on component levels. System reliability is evaluated using component reliability metrics that are given as functions of time and unknown stresses; this evaluation is based on a series system-reliability model. The variation in stress, which was not considered in previous derating designs, is introduced in the present design to account for the uncertainty in both environmental and operating conditions at the customer's hands. Optimization problems for system reliability improvement are formulated and solved using FORM to determine the best derating design. An example of a derating design for an electrical system shows the details of the proposed method and its applicability to systems design for reliability improvement.

- 기호설명 -

- m_i, η_i : 와이블 분포의 형상모수, 척도모수
- S** : 스트레스
- p** : 설계파라미터
- LSF : Limit-state function(임계상태함수)
- C** : Conformance region(순응/성공 영역)
- NC : Non-conformance region(비순응/실패 영역)
- Φ : 1차원 표준정규누적분포함수
- Φ_2 : 이변수(bivariate) 누적정규분포함수
- t : 동작시간
- t_c : 커패시터의 충전 횟수

1. 서론

제품의 신뢰성 향상을 위해 크게 부품 제어, 설계 제어, 부하경감에 대한 연구가 수행되고 있다. 부품 제어는 공정 설계를 통하여 부품들의 변량과 열화를 제어함으로써, 사용되는 부품의 동작 환경에서 고려된 시점까지 부품의 성능을 유지하는 것이다. 통계적인 공정 제어가 부품 제어의 한 가지 방법이다. 설계제어는 부품의 변량 및 열화에 둔감한 시스템을 설계하는 것이다. 강건(robust) 설계의 특성을 반영하여 부품 수준의 변량 및 열화가 시스템 성능에 미치는 영향을 최소화하는 것이 설계 제어이다. 따라서 설계 제어는 부품의 변량 및 열화가 시스템 성능에 미치는 영향을 제거하거나 최소화하는 기법이다.⁽¹⁾ 부하

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, ykson@andong.ac.kr

경감(derating)은 부품의 고장률을 줄여서 신뢰성을 향상시키고자, 사용 환경 또는 동작 중에 인가되는 스트레스를 정격보다 낮게 인가하는 방법으로 정의된다.⁽²⁾ 부하경감 연구는 부품들이 받는 전기적, 기계적 혹은 다양한 스트레스들을 낮추어 부품의 신뢰도를 증가시키는 것이다. 일반적으로 부하경감 설계연구를 통해 부품들이 받는 스트레스 수준을 결정하는데, 현재까지 부하경감 연구는 대부분 부품 수준에 국한되어 연구가 수행되고 있다.^(2,3)

일반적으로 여러 부품들로 구성되는 시스템은 온도, 전압, 전류, 진동등과 같은 다양한 스트레스들을 받고 있다. 부품 수준의 부하경감 설계가 시스템의 신뢰성 향상에 기여할 수 있지만, 효율적이고 경제적인 시스템 신뢰성 향상을 위해서는 부품 수준의 부하경감 수준과 시스템 신뢰도와의 상충관계(trade-off)를 고려해야만 한다. 이러한 상충관계를 고찰함으로써 시스템 신뢰성 향상을 위한 시스템을 구성하는 부품의 부하경감 수준을 효율적, 경제적으로 산정할 수 있는데 이러한 방법이 부품 수준이 아닌 시스템 수준의 부하경감 설계 기법이다. 그러나 현재까지 이러한 상충관계를 고려한 부하경감 연구는 극소수이다. Edson과 Tian은 부하경감 설계를 위하여 고장률 예측에 기반을 둔 신뢰성 설계 도구를 개발하였다.⁽²⁾ 개발된 설계 도구를 이용하여, 커패시터, 반도체 IC, 저항들로 구성된 전력 분산 보드에 대한 시스템 고장률을 모델화하였다. 각 부품이 받는 스트레스에 대한 시스템 고장률의 민감도를 평가하여 전력 분산 보드의 고장률을 최소화하기 위한 부품들의 최적의 스트레스(부하경감) 수준을 결정하였다. Tian은 power converter의 고장률과 구성 부품이 받는 스트레스와의 민감도를 이용하여 부하경감 설계를 수행하였다.⁽³⁾

시스템 고장률 예측에 기반을 둔 부하경감설계는 시스템을 구성하는 부품의 수명분포가 서로 독립적(independent)이며 일정한 고장률을 가지는 지수분포에 국한되어 적용되는 단점이 있다. 일반적으로 부품은 시간이 증가함에 따라 고장률이 감소하는 초기고장, 고장률이 일정한 우발고장, 그리고 고장률이 증가하는 마모고장 특성을 나타낸다. 따라서 고장률이 일정하지 않은 부품들로 구성된 시스템의 경우, 기존에 제시된 방법을 이용한 시스템 부하경감설계가 어렵다.

현재까지 시스템 수준의 부하경감 설계는 부품들이 받는 일정한 스트레스 수준을 고려하여 수행되어 왔지만, 부품들이 받는 스트레스들은 일정한 수준이 아니라 사용조건에 따라 스트레스 수준이 변화할 수 있다. 예를 들어, 전자 부품이 동작하는 주위 온도는 계절의 변화와 부품이 사용되는 환경에 따라 변화한다. 그러므로 스트레스 값에 대한 변량을 고려하여 부품들의 부하경감 수준을 결정해야 한다. 부품들이 받는 스트레스의 변량을 고려한 시스템 수준의 부하경감 설계 기법은 보다 더 현실적이며 실용적일 것이다.

본 연구에서는 수명평가에만 국한되어 왔던 신뢰성 분석을 응용하여 신뢰성 향상을 구현할 수 있는 부하경감설계 방법론을 제안하고자 한다. 제안하는 방법론은 스트레스 변량을 고려한 시스템 신뢰도의 평가방법을 제안하고 시스템 신뢰도를 최적화 할 수 있는 스트레스 수준을 정함으로써 궁극적으로 시스템의 신뢰도를 향상시키고자 한다.

2. 부하경감설계방법론

2.1 부하경감설계모델링

재료의 변량 및 생산 공정에서의 변량으로 인해 부품의 수명은 일정하지 않고 확률 분포특성을 나타낸다. 일반적으로 수명분포는 고장을 유발하는 스트레스를 결정한 후, 정상조건 보다 높은 스트레스 수준을 일정하게 인가하여 확보된 고장시간 데이터를 이용하여 추정된다. 추정된 수명분포는 재료 및 생산 공정에서의 변량을 반영하며, 스트레스의 함수로 표현된다. 수명분포가 와이블분포를 따르는 전자부품의 신뢰도 함수는 식 (1)로 표현된다.

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right] \quad (1)$$

스트레스에 대한 가속성이 성립한다는 가정 하에 형상모수는 동일하므로 스트레스 가속에 따라 척도모수의 값이 변화하기 때문에 일반적으로 척도모수가 스트레스의 함수이다.

여러 부품으로 구성된 시스템 신뢰도는 시스템 구조(topology)에 따라, 즉 부품들의 결합방식에 의해 결정되며 부품들의 신뢰도 함수의 조합이 시스템 신뢰도를 결정한다. 시스템이 동작하는데

영향을 주는 내부 스트레스(예. 전압, 전류 등)와 외부 스트레스(예. 온도, 상대습도, 진동 등)는 시스템을 구성하는 부품들의 고장을 유발한다. 재료의 변량 및 생산 공정에서의 변량에 의해 부품들의 성능이 일정한 값을 나타내지 않기 때문에 전기시스템인 경우 시스템에 인가되는 전압 및 전류에 변량이 존재한다. 또한 시스템이 동작하는 주위 환경에도 변량이 존재한다. 이러한 변량을 확률 분포를 가지는 변수로 모델링 할 수 있다.

N개의 부품들이 직렬로 결합된 시스템이 r개의 스트레스 $\mathbf{S} = [S_1, S_2, S_3, \dots, S_r]$ 를 받고 있다고 가정하자. 예를 들어 S_1 는 전압 혹은 온도를 나타낸다. 부품의 수명은 스트레스에 의해 결정되기 때문에 부품의 수명을 나타내는 확률 변수를 T_i 라 두면 부품의 신뢰도 함수는 다음과 같다.

$$R_i(t, \mathbf{S}) = \Pr[T_i > t], \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

시스템의 수명을 나타내는 확률 변수를 T 라 두고 시스템의 신뢰도와 누적고장함수를 T_i 를 이용하여 정의하면 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$\begin{aligned} R_S(t, \mathbf{S}) &= \Pr[T > t] \\ &= \Pr[(T_1 > t) \cap (T_2 > t) \cap \dots \cap (T_N > t)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} F_S(t, \mathbf{S}) &= 1 - R_S(t, \mathbf{S}) \\ &= \Pr[(T_1 \leq t) \cup (T_2 \leq t) \cup \dots \cup (T_N \leq t)] \end{aligned} \quad (4)$$

각 부품들의 수명에 영향을 주는 스트레스들이 서로 독립적일 때 시스템의 신뢰도 함수를 부품들의 신뢰도 함수를 이용하여 표현하면 식 (5)와 같다.

$$R_S(t, \mathbf{S}) = \prod_{i=1}^N R_i(t, \mathbf{S}) \quad (5)$$

그러나 온도에 의해 수명이 결정되는 부품 A와 B에 대하여, 시스템의 주변 온도는 부품 A와 B의 수명에 직접적인 영향을 주기 때문에 두 사건 $(T_A > t)$ 와 $(T_B > t)$ 는 서로 독립이 아니다. 따라서 시스템의 신뢰도함수를 평가하는 경우 식 (5)를 이용하면 오차가 발생하기 때문에 식 (3)을 이용하여야 한다.

임의 시점 t_d 에서 각 부품의 신뢰도에 대한 임계수준을 R_d 라 정의하자. 부품의 신뢰도를 이용하여 각 부품의 임계상태함수를 정의하면 다음과 같다.

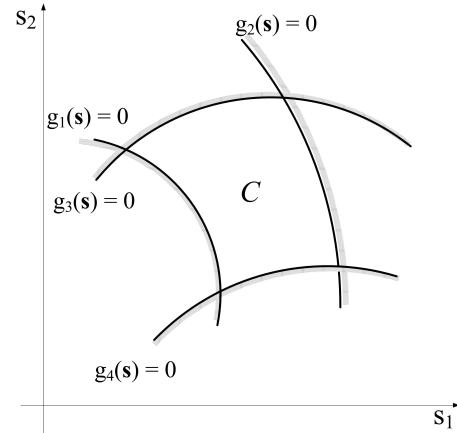


Fig. 1 LSFs and the system success region

$$g_i(\mathbf{s}) = R_i(t_d, \mathbf{s}) - R_d \quad (6)$$

따라서 임계수준이상을 만족하는 임계상태함수들의 성공영역과 실패영역은 다음과 같다.

$$C(\mathbf{s}, R_d) = \left\{ \mathbf{s} \in \mathbf{S} : (g_1(\mathbf{s}) > 0) \cap (g_2(\mathbf{s}) > 0) \cap \dots \right. \\ \left. \dots \cap (g_N(\mathbf{s}) > 0) \right\} \quad (7)$$

$$NC(\mathbf{s}, R_d) = \left\{ \mathbf{s} \in \mathbf{S} : (g_1(\mathbf{s}) \leq 0) \cup (g_2(\mathbf{s}) \leq 0) \cup \dots \right. \\ \left. \dots \cup (g_N(\mathbf{s}) \leq 0) \right\} \quad (8)$$

Fig. 1은 4개의 부품으로 구성된 시스템에 대한 각 부품의 임계상태표면과 실패영역(음영으로 표시)을 나타낸다. C는 시스템의 성공영역으로, 각 부품의 신뢰도가 R_d 이상을 만족하는 영역을 나타낸다. 시스템 성공영역은 요구되는 부품의 신뢰도를 모두 만족하는 영역이므로 이 영역에 대한 확률은 시스템 신뢰도가 R_d 이상을 만족하는 확률을 나타낸다. 그러므로 식 (7)의 성공영역 $C(\mathbf{s}, R_d)$ 에 대한 확률을 최대화하면, 시스템 신뢰도 $R_S(t_d, \mathbf{S})$ 를 최대화시킬 수 있으므로 시스템 신뢰도의 최대화 문제를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\max_{\mathbf{s}} \{ \Pr[C(\mathbf{s}, R_d)] \} \quad (9)$$

식 (7)에서 정의된 $C(\mathbf{s}, R_d)$ 가 교집합의 형태로 표현되어 이에 대한 확률을 평가하는 것이 어렵다. 따라서 합집합으로 표현된 식 (8)의 $NC(\mathbf{s}, R_d)$ 에 대한 확률을 최소화함으로써 시스템 신뢰도를 최대화할 수 있다. 그러므로 시스템 신뢰도를 최대화하는 문제를 식 (10)과 같이 정의할 수 있다.

$$\min_{\mathbf{s}} \{\Pr[NC(\mathbf{s}, R_d)]\} \quad (10)$$

식 (10)으로 표현되는 실패영역에 대한 확률을 평가하기 위하여, 각 임계상태함수들의 실패영역 E_i 를 다음과 같이 정의한다.

$$E_i(\mathbf{s}) = \{\mathbf{s} \in \mathbf{S} : g_i(\mathbf{s}) \leq 0\}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

E_i 를 이용하여 $\Pr[NC(\mathbf{s}, R_d)]$ 를 표현하면 다음과 같다.

$$\Pr(NC(\mathbf{s}, R_d)) = \Pr\left(\bigcup_{i=1}^N E_i(\mathbf{s})\right) \quad (12)$$

합집합에 대한 확률 이론으로부터 $\Pr[NC(\mathbf{s}, R_d)]$ 에 대한 상한값⁽⁴⁾을 이용하여 근사화하면 식 (13)으로 표현할 수 있다.

$$\Pr(NC(\mathbf{s}, R_d)) \cong \sum_{i=1}^N \Pr(E_i(\mathbf{s})) - \sum_{i=2, j < i}^N \left[\max(\Pr(E_i(\mathbf{s}) \cap E_j(\mathbf{s}))) \right] \quad (13)$$

변량을 가지는 r 개의 임의의 스트레스 \mathbf{S} 에 대한 모수를 p_i 와 p_{i+r} 이라 두면, 시스템에 영향을 주는 스트레스들에 대한 파라미터(parameter) 벡터는 $\mathbf{p} = [p_1, p_2, \dots, p_{2r}]$ 로 정의할 수 있다. 따라서 스트레스에 대한 Rosenblatt transformation⁽⁵⁾을 적용하면 식 (13)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Pr(NC(\mathbf{p}, R_d)) \cong \sum_{i=1}^N \Pr(E_i(\mathbf{p})) - \sum_{i=2, j < i}^N \left[\max(\Pr(E_i(\mathbf{p}) \cap E_j(\mathbf{p}))) \right] \quad (14)$$

2.2 FORM을 적용한 부하경감설계문제 공식화

식 (10)으로 정의되는 부하경감설계문제에 대한 해를 구하기 위하여 식 (14)의 확률값은 FORM(First-Order Reliability Method)⁽⁴⁾을 적용하여 평가된다. FORM을 적용하여 E_i 에 대한 확률값을 정의하면 $\Pr(E_i(\mathbf{p})) = \Phi[-a_i \beta_i(\mathbf{p})]$, 여기서 $a_i = g_i(\mathbf{u}=\mathbf{0})$, $\beta_i(\mathbf{p})$ 는 \mathbf{u} 공간에서 원점에서 i 번째 임계상태표면의 \mathbf{u}^* (MLFP, Most Likely Failure Point)까지의 거리를 나타낸다. 또한 2개의 실패영역, 즉 E_i 와 E_j 에 대한 교집합 영역의 확률은 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\Pr(E_i(\mathbf{p}) \cap E_j(\mathbf{p})) \cong \Phi_2(-\beta_i(\mathbf{p}), -\beta_j(\mathbf{p}); \rho_{i,j}) \quad (15)$$

여기서, $\rho_{i,j}$ 는 원점 $\mathbf{u} = \mathbf{0}$ 에서 \mathbf{u}_i^* 와 \mathbf{u}_j^* 에 이르는 벡터들의 직교성(orthogonality)을 나타내며, 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_{i,j} = \frac{(a_i \mathbf{u}_i^*) \cdot (a_j \mathbf{u}_j^*)}{\|a_i \mathbf{u}_i^*\|_2 \|a_j \mathbf{u}_j^*\|_2} \quad (16)$$

본 연구에서는 Drezner⁽⁶⁾가 제안한 방법을 이용하여 식 (16)을 평가한다. 따라서 FORM을 적용하면 식 (14)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Pr(NC(\mathbf{p}, R_d)) \cong \sum_{i=1}^N \Phi(-a_i \beta_i(\mathbf{p})) - \sum_{i=2, j < i}^N \left[\max(\Phi_2(-\beta_i(\mathbf{p}), -\beta_j(\mathbf{p}); \rho_{i,j})) \right] \quad (17)$$

따라서 임의의 시점 t_d 에서 시스템 신뢰도를 최대화하기 위한 부하경감수준을 결정하기 위한 최적화 문제를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{\mathbf{p} \in R^T} \{\Pr(NC(\mathbf{p}, R_d))\} \\ & \text{subject to} \\ & g(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = 0, \quad \mathbf{u} \cdot \text{null}(-\nabla_{\mathbf{u}} g(\mathbf{u}, \mathbf{p})) = 0, \\ & \mathbf{p}_L \leq \mathbf{p} \leq \mathbf{p}_U \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 \mathbf{p}_L 과 \mathbf{p}_U 는 스트레스 \mathbf{p} 에 대한 하한 및 상한 한계를 나타낸다.

3. 설계방법론 적용 연구

정전압 IC, 증폭용(amplifier) IC, 알루미늄 전해 커패시터, 녹색 LED로 구성된 오디오 시스템을 고려해 보자. 임의의 시점 t_d 에서 오디오 시스템의 신뢰도를 최대화하기 위한 부하경감수준을 결정하기 위해 제안한 설계방법론을 적용한다. 본 논문에서는 문헌에 공개된 신뢰도함수들을 이용하였는데, 이러한 신뢰도함수들은 각 부품의 고장 모드와 고장모드를 유발하는 스트레스를 이용하여 수행한 가속수명시험결과로부터 와이블분포를 가정하여 실험적으로 추정된 형상 및 척도 모수값들을 이용하여 정의되었다.

동작 전류 범위가 5.0[mA] ~ 1.0[A]인 정전압 IC의 경우, 전류와 온도 스트레스에 의한 package delamination에 따른 전압강하(voltage drop)가 주요 고장모드이며 신뢰도 함수는 식 (19)로 표현된다.⁽⁷⁾

$$R_1(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta_1(I, T)} \right)^{m_1} \right] \quad (19)$$

여기서 $\eta_1(I, T) = a_1 \exp(c_1/T) / I^{b_1}$ 이며, $m_1=9.21$, $a_1=7.8515 \times 10^{-5}$, $b_1=0.57$, $c_1=7168.94$ 이다.

정격 전압이 25[V]인 알루미늄 커패시터의 경우, 전압과 온도에 의한 커패시터 전해액의 dry up에 따른 정전용량의 감소가 주요 고장모드이며 신뢰도 함수는 식 (20)으로 표현된다.⁽⁸⁾

$$R_2(t) = \exp\left[-\left(\frac{t_c}{\eta_2(V, T)}\right)^{m_2}\right] \quad (20)$$

여기서 $\eta_2(V, T) = a_2 \exp(c_2/T) / V^{b_2}$ 이며, $m_2=8.08$, $a_2=0.5603$, $b_2=2.60$, $c_2=5413.37$ 이다.

녹색 LED인 경우, 온도와 습도에 의한 chip과 lead의 부식에 따른 광량 감소가 주요 고장모드이며 신뢰도 함수는 식 (21)로 표현된다.⁽⁹⁾

$$R_3(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta_3(T, RH)}\right)^{m_3}\right] \quad (21)$$

여기서 $\eta_3(T, RH) = a_3 \exp(b_3/T + c_3/RH)$, $m_3=2.0314$, $a_3=1.6889 \times 10^{-8}$, $b_3=7486.55$, $c_3=385.79$ 이다. 증폭용 IC인 경우, 온도에 의한 IC 내부 배선의 void 형성에 따른 단선(short)이 주요 고장모드이며 신뢰도 함수는 식 (22)로 표현된다.

$$R_4(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta_4(T)}\right)^{m_4}\right] \quad (22)$$

여기서 $\eta_4(T) = a_4 \exp(b_4/T)$, $m_4=5.1536$, $a_4=0.72$, $b_4=3406.95$ 이다.

본 연구에서는 식 (19)~(22)로 표현되는 부품들의 신뢰도 함수를 이용하여 부하경감설계를 수행한다.

시스템의 부하경감설계를 수행할 때, 각 부품의 신뢰도 함수의 시간 단위를 동일하게 보정해야 한다. 따라서 오디오 시스템이 전원 인가 후 1일 12시간 동작한다고 가정하면 시간 단위를 일[day]을 기준으로 표현하면, 커패시터의 경우 1일에 1회 충전되므로 t 의 단위가 일[day]이 된다. 그러나 정전압 IC, 증폭용(amplifier) IC, 녹색 LED인 경우, 사용시간을 기준으로 신뢰도 함수들이 표현되기 때문에 1일 기준으로 바꾸면, 식 (19), (21), (22)에 제시된 신뢰도 함수들의 t 대신 $12t$ 를 대입하여야 한다. 예를 들어 정전압 IC의 신뢰도 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$R_1(t) = \exp\left[-\left(\frac{12t}{\eta_1(I, T)}\right)^{m_1}\right] \quad (23)$$

오디오 시스템을 구성하는 부품들의 수명에 영향을 주는 스트레스가 전류(I), 온도(T), 전압(V), 상

대습도(%RH)이므로 스트레스 행렬을 $S = [S_1, S_2, S_3, S_4] = [I, T, V, RH]$ 라 정의하자. 임의 시점 t_d 에서 임계수준을 R_d 라 두면 정전압 IC에 대한 임계상태함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g_1(s) = \exp\left[-\left(\frac{12t_d}{\eta_1(s)}\right)^{m_1}\right] - R_d \quad (24)$$

여기서 $\eta_1(s) = a_1 \exp(c_1/s_2^{c_1}) / s_1^{b_1}$ 이다.

Fig. 2의 등고선은 증폭용 IC의 임계수준 R_d 에 대한 임계상태표면을 나타낸다. Fig. 2(a)는 평균이 60 [°C]인 정규분포를 따르는 온도인 경우, $R_d = 0.9$ 에 대하여 300일 시점에서 거의 모든 온도에 대하여 0.9를 만족하고 있지만 850일 시점에서는 신뢰도 0.9를 만족시키지 못하는 온도범위가 존재한다. 이러한 온도 범위를 Fig. 2(a)에서 사선으로 표시하였다. Fig. 2(b)는 온도 평균이 50 [°C]인 경우를 나타

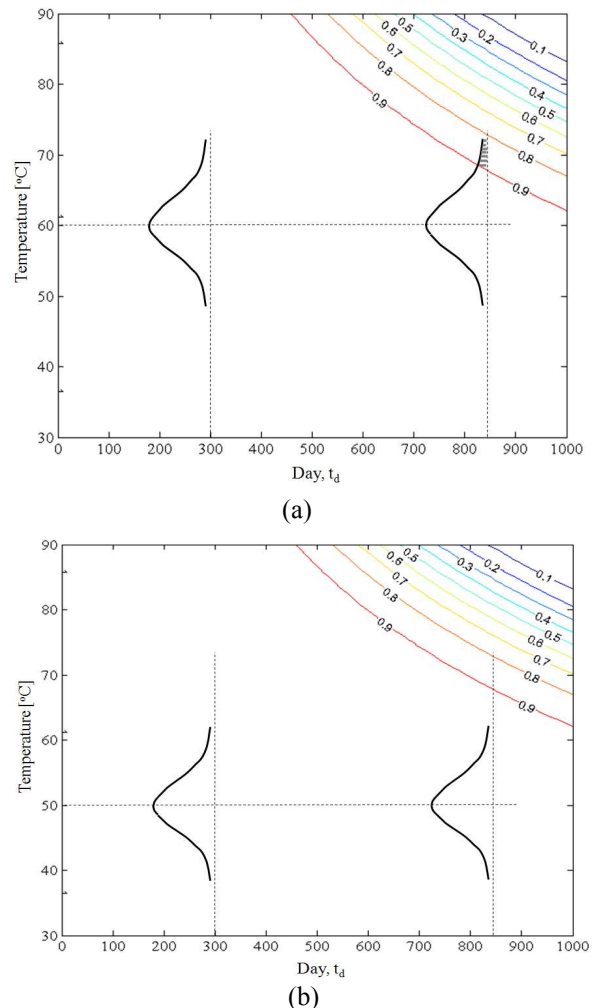


Fig. 2 LSF of the amplifier IC for different temperatures (a) 60 °C (b) 50 °C

내는데, 300일 및 850일 시점에서 거의 모든 온도에 대하여 신뢰도 0.9를 만족한다. 본 연구에서 제안하는 부하경감설계는 임의의 시점에서 설정된 신뢰도에 대한 임계값을 만족하는 온도의 평균값을 설정하여 신뢰도를 향상시키는 것이다.

전류, 온도 및 전압 스트레스들은 부하경감설계를 통해 제어할 수 있는 설계변수이고, 상대습도는 제어할 수 없는 노이즈(noise) 변수로 정의하고 가정한다. 각 스트레스들의 분포 특성과 분포 파라미터를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 COV(Coefficient of Variation)는 σ/μ 로 정의되므로 $\sigma_i = \mu_i \times COV_i$ 이다. 스트레스들에 대하여 Rosenblatt transformation을 적용하면 전류와 온도, 전압은 $s_i = \mu_i + \sigma_i u_i$, $i = 1, 2, 3$ 이고, 상대습도는 $s_4 = \mu_4 - \sigma_4 + 2\sigma_4 \Phi(u_4)$ 이다. 일반적으로 스트레스의 변량을 제어하기 어렵기 때문에, 부하경감설계를 위해 제어할 수 있는 설계변수를 스트레스의 평균값으로 정의하면 설계 파라미터는 $\mathbf{p} = [\mu_1, \mu_2, \mu_3]$ 이다. 따라서, 정전압 IC에 대한 임계상태함수를 설계 파라미터로 표현하면 다음과 같다.

$$g_1(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = \exp \left[- \left(\frac{12t_d}{\eta_1(\mathbf{u}, \mathbf{p})} \right)^{m_1} \right] - R_d \quad (25)$$

여기서

$$\eta_1(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = \frac{a_1}{(\mu_1 + \sigma_1 u_1)^{b_1}} \exp \left(\frac{c_1}{\mu_2 + \sigma_2 u_2 + 273.16} \right)$$

동일한 방식으로 커패시터, LED, 증폭용 IC에 대한 임계상태함수를 \mathbf{u} 와 \mathbf{p} 를 이용하여 표현할 수 있다.

부하경감설계의 초기 파라미터가 $\mathbf{p}_0 = [230, 60, 25]$ 일 때, $t_d = 730$ 일 시점에서 $R_d = 0.9$ 인 경우, $\Pr[NC(\mathbf{s}, R_d)] = 0.3573$ 이므로 시스템 신뢰도가 0.9이상을 만족하는 확률이 0.6427임을 나타낸다. 시스템을 구성하는 부품들의 임계상태표면을 \mathbf{u} -space에 나타내기 위하여 상대습도를 60%[RH], 전압을 25[V]로 고정한 후, $u_3 = u_4 = 0$ 라 두고 온도와 전류에 대한 임계상태표면을 Fig. 3에 표시하였다. Fig. 3의 음영으로 표시된 영역은 임계상태함수의 실패영역을 나타낸다. 전류 범위가 $10 \leq \mu_1 \leq 1000$ [mA], 전압 범위가 $10 \leq \mu_3 \leq 30$ [V]로 주어진 경우, 온도 범위에 따른 시스템 부하경감설계 결과와 각 설계에 대하여 시스템 신뢰도가 0.9이상을 만족할 확률, $\Pr[C(\mathbf{p}_i, R_d = 0.9)]$ 을 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Stress distributions and the parameters

Control variables	distribution	Parameters
S ₁ (I)	normal	μ_1 [mA], COV ₁ = 10%
S ₂ (T)	normal	μ_2 [°C], COV ₂ = 10%
S ₃ (V)	normal	μ_3 [V], COV ₃ = 10%
Noise variable		
S ₄ (%RH)	uniform	$\mu_4=60$ [%RH], COV ₄ = 50%

Table 2 Derating design results

Temperature range, [°C]	Design, $\mathbf{p}_i = [\mu_1, \mu_2, \mu_3]$	Probability
$30 \leq \mu_2 \leq 90$	$\mathbf{p}_1 = [228.87, 30.0, 25.43]$	0.9999
$40 \leq \mu_2 \leq 90$	$\mathbf{p}_2 = [229.23, 40.0, 25.16]$	0.9656
$45 \leq \mu_2 \leq 90$	$\mathbf{p}_3 = [227.95, 45.0, 22.29]$	0.8766
$48 \leq \mu_2 \leq 90$	$\mathbf{p}_4 = [44.35, 48.0, 10.01]$	0.8312
$50 \leq \mu_2 \leq 90$	$\mathbf{p}_5 = [28.45, 50.0, 19.17]$	0.7959
$55 \leq \mu_2 \leq 90$	$\mathbf{p}_6 = [10.00, 55.0, 10.00]$	0.7140

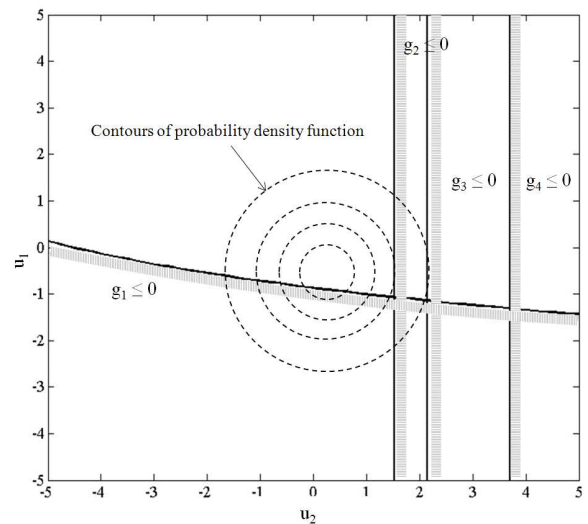


Fig. 3 Limit-state functions for the audio system

부하경감설계 \mathbf{p}_1 은 730일 시점에서 시스템 신뢰도가 0.9 이상을 만족할 확률이 1에 근접한다. 따라서 1000개의 오디오 시스템이 전류 평균값 228 [mA], 온도 평균값 30[°C], 전압 평균값 25 [V]인 환경에서 사용되는 경우 730일 시점에서

약 900개의 시스템이 정상적으로 동작함을 보증할 수 있다. Table 2의 부하경감설계 결과로부터, 최적의 온도값이 고려된 온도범위의 하한값과 동일하므로 온도가 전압 및 전류보다 시스템의 신뢰도에 많은 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다. 또한 설계 p_1 , p_2 , p_3 로부터 온도 평균값을 45 [°C] 이하로 유지할 수 있는 경우에, 전압과 전류의 최적값이 초기값과 비교하여 변화량이 미소하기 때문에 시스템 신뢰도를 향상시키기 위해서는 전압과 전류를 제어하는 것보다 온도를 제어하는 것이 효율적이다. 또한 설계 p_4 , p_5 , p_6 로부터 온도 평균값을 45[°C] 이하로 유지할 수 없는 경우에는 온도와 전압, 전류를 동시에 제어하는 것이 필요하다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 여러 부품들로 구성되는 시스템이 다양한 스트레스 환경에서 동작할 때, 시스템의 신뢰도를 향상하기 위한 시스템 수준의 부하경감 설계기법을 제안하였다. 제안한 설계기법은 고장률 함수를 이용하지 않고 신뢰도 함수를 이용하기 때문에 다양한 수명분포를 따르는 부품들로 구성된 시스템에 적용할 수 있다. 또한 스트레스의 변량을 고려하여 기존에 제시된 시스템 수준의 부하경감설계의 문제점을 극복하였기 때문에 보다 더 현실적이며 실용적인 설계기법이다. 또한 부하경감설계 문제를 구속조건을 가지는 최적화문제로 모델링하여, 시스템 신뢰도를 최적화 할 수 있는 스트레스 수준을 선정하였다. 설계 예제를 통하여 제안한 설계기법의 응용성과 유용성을 나타내었다.

향후에는 스트레스 수준을 줄이는 비용과 시스템 신뢰도와의 상충관계를 고려한 경제적인 부하경감설계에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2008학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구 되었음

참고문헌

- (1) Son, Y.K. and Savage, G.J., 2007, "Optimal Probabilistic Design of the Dynamic Performance of a Vibration Absorber," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 307, No.1/2, pp. 20~37.
- (2) Edson, B. and Tian, X., 2004, "A Prediction Based Design-for-Reliability Tool," Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 412~417
- (3) Tian, X., 2005, "Design-for-Reliability and Implementation on Power Converters," Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 89~95
- (4) Melchers RE., 1987, Structural Reliability Analysis and Prediction. Wiley: Chichester
- (5) Rosenblatt, M., 1952, "Remarks on a Multivariate Transformation," Annual of Mathematical Statistics, Vol. 23, pp. 470~472.
- (6) Drezner, Z., Wesolowsky G. O., 1990, "On Computation of the Bivariate Normal Integral," *Journal of Statistical Computation and Simulation*, Vol. 35, pp. 101~107.
- (7) Lee, J.-S., Kim, J.-J., and Kwack, K.-D., 2006, "Accelerated Life Test for Regulator IC," Proceeding of the KSME 2006 Fall Annual Meeting, pp. 2396~2401.
- (8) Min, D.-J., Kim, J.-J., Son, Y.K., and Kwack, K.-D., 2007, "Derating Design Approach of Aluminum Electrolytic Capacitor for Reliability Improvement," Proceeding of the KSME 2007 Spring Annual Meeting, pp. 1712~1717.
- (9) Lee, J.-H., Choi, J.-W., Chang, M.-S., Shin, S.-J., and Kwack, K.-D., 2007, "Lifetime Estimation and Comparison of RGB LEDs for Electric Signs Use," Proceeding of the KSME 2007 Fall annual meeting, pp. 1272~1277.
- (10) Lee, H.-Y., Chang, M.-S., and Kwack, K.-D., 2008, "Lifetime Estimation of Amplifier IC due to Electromigration Failure," Proceeding of the KSME 2008 Fall Annual Meeting, pp. 1265~1270.