

# 신뢰성 향상을 위한 부하경감기법 연구동향

## Research Trends of Derating Techniques for Reliability Improvement

김 종 곁\* · 김 진 국\*\*

Jong-Gurl Kim\* · Jin-Kuk Kim\*\*

### Abstract

디레이팅 과정은 개발 초기 단계에 제품의 신뢰성을 높이기 위하여 제어 가능한 스트레스 항목에 대해 제한을 두는 것이다. 부품의 열적, 전기적, 기계적 스트레스 등 여러 스트레스에 대해서 실제 부품의 규격보다 낮은 수준으로 사용을 제한하는 것을 디레이팅이라 하며, 부품의 고장률과 수명은 주위의 온도나 전기적 스트레스 등에 의해서 변화하기 때문에 신뢰성을 높이기 위해서는 부품의 사용조건을 최대정격보다 경감해서 사용하는 것이 필요하다. 또한 디레이팅과 고장메커니즘 간에는 밀접한 관계가 있지만 디레이팅이 모든 부품들의 고장률과 스트레스 개선을 똑같이 해주는 것은 아니기 때문에 공학적인 경험이 응용되어야 한다[1]. 본 연구에서는 디레이팅 기법에 대한 최근 연구 동향을 살펴보고 향후 고장메커니즘 분석 및 부하강도 분석을 통한 디레이팅 방법을 연구해 보고자 한다.

**Keywords:** Derating(부하경감), Stress-Strength Analysis(SS 분석)

### 1. 서 론

디레이팅은 부품의 고장률을 줄여서 신뢰성을 향상시키고자 사용 환경 또는 동작 중에 인가된 스트레스를 정격보다 낮게 인가하는 방법으로 정의된다. 전자 설계시의 디레이팅은 기계설계에서의 안전계수(Safety Factor)로 불린다. 단, 한 가지 차이는 디레이팅은 안전계수가 실제 사용 스트레스의 배수로 설정되는 것과는 달리 최대 인가되는 스트레스의 백분율로 표시된다는 것이다. 즉, 50% 디레이팅은 안전계수로는 2이다. 최근에 연구 동향으로 디레이팅 설계(부하경감 설계)는 제품의 신뢰성을 향상시키기 위하여 부품의 스트레스 수준을 낮추거나, 부품의 강도를 높임으로써 부품의 수명을 연장시키는 기술로 정의되고 있다[5].

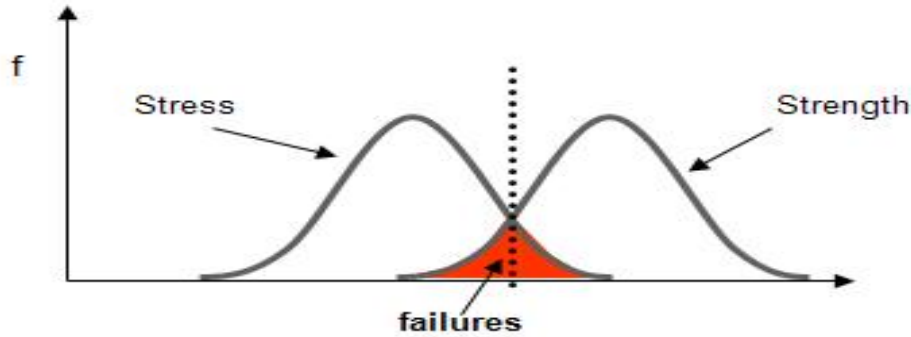
\* 성균관대학교 시스템경영공학과

\*\* 성균관대학교 산업공학과

디레이팅의 방법은 부품의 종류, 동작환경, 부품의 응용에 따른 한계레벨에 의존하며 3가지 단계로 구성되어 있다. 첫째, 부품의 한계레벨이 결정되어야 한다. 이것은 예상치 못하는 환경 조건, 응용 그리고 기능이 결정되어야 한다. 둘째, 특정 실제 부품에 가해지는 스트레스에 대한 정보가 계산되어야 한다. 마지막으로 실제적인 부품의 수치와 부하경감의 조건에 대해서 확인되어야 한다[1].

## 2. 부하강도 분석(Stress-Strength Analysis)

부품이 정상적으로 동작하기 위해서는 부품의 강도가 부품에 가해지는 스트레스보다 커야 한다. 그러나 강도와 스트레스가 랜덤하게 변하는 값이기 때문에 부품의 강도를 넘어서 스트레스가 가해질 경우가 있고 이 교차부분이 클수록 부품의 고장발생 확률이 커지게 된다.



[그림 1] 부품의 강도와 스트레스의 관계

[그림 1]과 같이 스트레스에 대한 분포 A와 강도의 산포에 대한 분포 B가 겹치는 부분에서 고장 및 파괴가 발생된다. 분포 A, B가 정규분포를 따른다고 하고 스트레스 분포 A의 평균을  $\mu_A$ , 표준편차를  $\sigma_A$ , 강도 분포 B의 평균을  $\mu_B$ , 표준편차를  $\sigma_B$ 라 하면 두 분포의 차의 분포도 정규분포를 따르고 평균 및 표준편차 다음과 같다.

$$\mu_{A-B} = \mu_A - \mu_B \quad (1)$$

$$\sigma_{A-B} = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} \quad (2)$$

두 분포의 교차부분에 대한 불량률은 표준정규분포로 식 (3)과 같이 변환하여 Z table에 의해 구해진다.

$$Z = \frac{\mu_A - \mu_B}{\sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2}} \quad (3)$$

이러한 부하강도간섭(Stress-Strength Interference) 이론의 고전적인 방법은 최악의 스트레스 조건에서의 부품의 강도를 확보하기 위하여 충분한 강도를 가지고 있는 부품을 선택함으로써 부품의 강도분포 곡선을 오른쪽으로 이동시키는데 이는 잠재 고장 확률을 줄이기 위하여 과도설계(over design)를 하게 된다. 부하강도간섭 이론에서 전체 가정 조건은 강도는 시간 경과에 따라 열화가 되지 않는다는 것이고 고장률 예측의 정확도는 스트레스 정보에 의존하여 결정된다. 디레이팅시 스트레스 분석의 목적은 스트레스와 강도 간의 적절한 값을 구하여 신뢰성 있는 설계를 하고자 하는 것으로 스트레스의 디레이팅을 위해서 다음의 4가지 방법을 고려하여 실시한다[1].

- 1) 평균 강도의 증가
- 2) 평균 스트레스의 감소
- 3) 스트레스의 분산 감소
- 4) 강도의 분산 감소

디레이팅 및 안전계수의 목적은 사용 환경 및 부품의 동작특성의 근본적인 분산에 대하여 제품을 보호하고 고장을 방지하고자 하는 것이다. 특히 동작특성에서의 작은 변화가 고장률을 크게 증가시키는 것을 방지하기 위한 것이다. 요구되는 디레이팅의 수준(40%, 50%, 60% 등)은 설계자가 동작특성이 조립되기 전에 제조공정상의 분산과 보다 중요한 사용 중의 사용 환경의 분산 등이다. 두 가지 분산의 원인은 알기 어렵고 대부분인 경우 설계 당시 정확하게 정량화하는 것이 불가능하다. 따라서 공학적인 판단 및 과거 경험을 통하여 주로 그 효과를 예측하고 디레이팅 수준을 결정해야 한다[1].

### 3. 디레이팅 관련 연구 동향

현재 디레이팅의 연구 동향은 과거 수동 및 능동소자 중심의 부품단위 디레이팅에서 모듈, 시스템의 신뢰성 향상을 위한 부하경감 설계를 유도하고 있다. 실 사용 조건을 반영하여 전압, 온도, 습도 등을 동시에 고려한 가속열화시험을 설계, 실시하고 와이블 분포와 일반화된 선형모형을 가정하여 데이터를 분석하며 수명-스트레스 관계식을 추정, 고장률 예측을 하고 있다. 고장률 예측을 통하여 적합한 디레이팅을 수행, 설계 개선을 하고 있는 것이다. 이에 주요한 논문 몇 가지를 살펴보면 다음과 같다.

[LED(Light Emitting Diode)의 부하경감 설계 연구]에서는 LED의 주 고장메커니즘은 부식(Corrosion)이고 고장모드는 부식에 의한 Light output reduction 및 반도체부의 Short라는 것을 규명하였다. 가속수명시험에서는 스트레스를 온도 및 습도로 선정하여 와이블 형상모수와 수명-스트레스 관계식을 추정하였으며 추정된 결과를 토대로  $B_{10}$  수명식 및 고장률의 관계식과 추정하였다. 부가적으로 스트레스에 대한 민감도 분석 결과 습도 변화에 대한 수명의 특성변화가 크다는 것을 알 수 있었고, 이를 고려한 신뢰성 향상을 위한 부하경감 설계 시 온도와 습도의 적절한 스트레스 수준을 결정할 수 있게 연구 하였다[4].

[전자장비 신뢰도 향상을 위한 정량적 접근 연구]의 내용을 살펴보면 소자의 신뢰도 분석 연구 결과 작동온도에 따른 신뢰도 개선 효과보다 소자 활성화 에너지에 따른 신뢰도 개선 효과가 훨씬 유리함을 확인 하였다. 미 공군 조사 자료에 따르면 항공우주 전자 장비를 구성하는 전자 소자의 주요 고장 요인으로는 온도에 의한 고장이 55%로 가장 높고 다음으로 진동에 의한 고장이 20%, 습도에 의한 고장이 19%등의 순이다. 회로를 구성하는 전자소자들은 일단 PCB위에 장착되면 온도를 제외한 다른 모든 신뢰도 인자들은 이미 결정되며 소자의 동작온도가 유일하게 소자 신뢰도에 영향을 준다.

반도체 소자에서 활성화 에너지( $E_a$ )는 어떤 화학반응이 발생하기 위해 필요한 최소 에너지를 말한다. 그러나 신뢰도 측면에서의 반도체 소자 활성화 에너지는 온도 가속 고장 메커니즘을 유발하는 최소 에너지를 말한다. 활성화 에너지와 고장률의 관계는 기본적으로 Arrhenius 공식을 널리 사용한다.

$$\lambda = MTTF^{-1} = A \cdot \exp(-E_a/kT) \quad (4)$$

이때 A는 실험적상수이고, T는 고장메커니즘이 발생하는 절대 온도이다. 활성화 에너지의 값은 온도에 의해 가속되는 고장 메커니즘의 상대적 경향을 나타낸다. 즉 낮은  $E_a$  값일수록 온도에 의해 고장이 쉽게 발생한다. 우선 접합온도에 의한 신뢰도 영향을 살펴보면  $E_a$ 가 0.04eV인 TTL 소자와 0.50eV인 BiCMOS 소자 경우 접합온도가 70℃ (343° K)에서 100℃ (373° K)로 상승하게 되면 다음과 같이 고장률이 증가한다.

$$\Delta \lambda_{TTL|70^{\circ}\text{C} \rightarrow 100^{\circ}\text{C}} = \frac{\lambda_{TTL|100^{\circ}\text{C}}}{\lambda_{TTL|70^{\circ}\text{C}}} = \exp\left[-\frac{0.04}{8.62 \times 10^{-5}} \times \left(\frac{1}{373} - \frac{1}{343}\right)\right] = 2.96$$

$$\Delta \lambda_{Bicmos|70^{\circ}\text{C} \rightarrow 100^{\circ}\text{C}} = \frac{\lambda_{Bicmos|100^{\circ}\text{C}}}{\lambda_{Bicmos|70^{\circ}\text{C}}} = 3.89$$

TTL 소자와 BiCMOS 소자의 접합온도가 30℃ 증가함에 따라 고장률이 각 2.96와 3.89배로 높아진다. 위의 결과로 분석하면 활성화 에너지 값이 높은 소자일수록 소자의 접합온도 변화는 신뢰도에 더욱 많은 영향을 받는다. 반면 접합온도를 일정하게 유지하는 조건하에서 TTL 소자 대신 BiCMOS 소자를 이용하여 설계하였을 때 신뢰도에 미치는 영향을 아래에 비교 하였다.

$$\Delta \lambda_{100^{\circ}\text{C}|TTL \rightarrow Bicmos} = \frac{\lambda_{100^{\circ}\text{C}|Bicmos}}{\lambda_{100^{\circ}\text{C}|TTL}} = \frac{1}{22}$$

$$\Delta \lambda_{70^{\circ}\text{C}|TTL \rightarrow Bicmos} = \frac{\lambda_{70^{\circ}\text{C}|Bicmos}}{\lambda_{70^{\circ}\text{C}|TTL}} = \frac{1}{29}$$

접합온도가 100℃ 일 경우 소자 대체를 통해 고장률이 1/22배 낮아지고, 접합온도가 70℃ 일 경우는 소자 대체를 통해 고장률이 1/29배로 낮아진다. 동일 온도 하에서 활성화 에너지가 높은 소자를 사용하면 활성화 에너지 값의 차이에 따라 신뢰도가 지수적으로 비례한다. 그러므로 높은 신뢰도가 요구되는 시스템에서는 활성화 에너지가 높은 소자를 선택하는 것이 바람직하다[3].

[시스템 신뢰성 향상을 위한 확률적 부하경감설계 연구]에서는 부품수준에 국한된 연구 수행을 벗어나 여러 부품들로 구성되는 시스템 수준의 부하경감 설계를 수행하였다. 일반적으로 여러 부품들로 구성되는 시스템은 온도, 전압, 전류, 진동 등과 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 상충관계를 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 설계기법이다. Edson과 Tian은 부하경감 설계를 위하여 고장률 예측에 기반을 둔 신뢰성 설계 도구를 개발하였다. 개발된 설계 도구를 이용하여 캐패시터, 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.

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 수분이 변화할 수 있다. 예를 들어 전자부품이 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[2].

#### 4. 향후 연구방향

전자부품의 제조회사는 일반적으로 자신이 제조한 부품에 대하여 정해진 환경과 사용조건에 적합한 사양과 이를 명기한 사양서를 제공한다. 하지만 부품의 제조회사가 규정해 놓은 동작조건/사용 환경조건과 실제 그 부품을 사용하는 동작조건/사용 환경조건 사이에 차이가 있을 경우에는 부품의 사용을 선정하는 제품 제조회사에서는 반드시 적절한 부품이 제품에 사용되어 졌는가를 판단하는 추가적인 확인, 인증 절차가 필요하게 된다. 전자제품을 포함한 모든 부품들은 항상 Safety Margin을 감안하여 설계하므로 실제 적용시의 동작온도 범위의 규정과 실제 그 부품이 제대로 성능을 발휘할 수 있는 온도범위 사이에는 규정된 사양 마진이 항상 존재하게 된다. 이러한 마진은 부품제조회사의 입장에서 보면 설계, 제조 공정, 설비, 재료의 변동 등 일정수준의 변동에 노출될 수밖에 없다. 때문에 이러한 마진설계는 부품에 대한 전수검사를 줄이거나 제거하고 대신 샘플 시험이나 통계적 공정 관리를 이용할 수 있게 하는 근간이 될 수 있다.

기존의 디레이팅 방법의 연구는 대부분 스트레스 혹은 강도의 산포는 크게 고려하지 않고 부하를 경감하는 방법을 취하고 있으나 기존과 같은 평균값을 보이고는 있지만 산포를 줄여 제조사가 원하는 Safety Margin을 손쉽게 얻을 수도 있을 것이다. 이에 앞서 기술한 디레이팅 방법 중 스트레스 및 분산 감소를 통해 신뢰성 파라미터에 어떠한 영향을 미치는지 증명하고 민감도 분석을 병행하여 신뢰도와 디레이팅의 최적점을 도출하고자 한다. 또한 모듈 및 시스템 수준에서 여러 사용 환경을 고려한 디레이팅 방법들을 제시하려 한다.

#### 5. 참 고 문 헌

- [1] 수원대학교 신뢰성혁신센터, 디레이팅(Derating), 2007.
- [2] 손영갑, “시스템 신뢰성 향상을 위한 확률적 부하경감설계”, 대한기계학회, 2010.
- [3] 김주년, 김보관. “전자장비 신뢰도 향상을 위한 정량적 접근 연구”, 한국항공우주학회, 2007.
- [4] 김병남, 김재중, 강원창, 손영갑, 장석원 광계달. “LED(Light Emitting Diode)의 부하경감 설계”, 대한기계학회, 2007.
- [5] DoD, “MIL-HDBK-217K Reliability Prediction of Electronic Equipment”, DoD USA, 1991.

## 저 자 소 개

### 김 종 결

서울대학교 계산통계학에서 석사  
한국과학기술원 산업공학과에서 박사학위  
현재 한국품질보증/PL 연구회 회장으로 활동  
성균관대학교 시스템경영공학과 교수로 재직

주소:경기도 수원시 장안구 천천동 300번지 성균관대학교 시스템경영공학과 27416호

### 김 진 국

성균관대학교 산업공학과 석사학위  
성균관대학교 산업공학과 박사과정  
관심분야: 부하경감을 고려한 신뢰도 예측, 복합 스트레스를 적용한 가속수명설계,  
임베디드 제품의 신뢰성 경영시스템 구축

주소:경기도 수원시 장안구 천천동 300번지 성균관대학교 시스템경영공학과 26418B호