2014방재기술56호-내지.ps 2014.7.3 9:35 AM 페이지14 mac2 XPose__cmyk 2400DPI 175LPI T

온도 스트레스를 이용한 연기감지기 가속수명시험에 대한 고찰

A Study on the Accelerated Life Testing for Smoke Fire Detector Using Temperature Factor

홍성호 공학박사 · 책임연구원

1. 머리말

신뢰성이란 아이템이 규정된 사용조건하에서 의도하는 기간에 요구되는 기능을 수행할 확률을 말한다[1]. 신뢰성은 설계단계에서 결정되는 품질특성 중 하나로 설계 및 제조단계에서 신뢰성을 개선 · 보증하기 위한 시험을 실시하고 있다. 한편, 기술발전속도가 빨라짐에 따라 제품 수명주기와 개발기간이 짧아지고 있고 새로운 재료, 부품 및 기술에 대한 시험평가를 위한 충분한 시간이 부족하여 신뢰성이 문제가 되고 있다. 또한 높은 신뢰성을 갖는 제품의 시험은 오랜 기간과 많은 비용이 소요되므로 신뢰성을 빨리 확인할 수 있는 가속수명시험(Accelerated life testing, ALT)에 대한 필요성과 요구가 계속 증가하고 있다[2-3].

가속수명시험은 제품의 고장을 가속할 수 있는 온도 등의 스트레스를 사용 조건보다 높게 설정한 시험으로 수명분포와 수명-스트레스 관계를 이용하여 가속조건에 관측된 수명 데이터를 분석하고 이로부터 사용조건에서의 수명을 예측하는 것이다. 가속방법은 여러 가지 파라미터가 사용되는데 주로 온도, 습도, 전압, 압력 등의 수준을 올리는 방법을 쓴다[4-6]. 정상 사용조건하에서 화재감지기의 수명(내구연한)을 예측하기에는 장기간이 필요하다.

본 원고에서는 대상품에 대하여 단기간에 분석하는 시험인 가속수명시험을 이용하여 연기감지기의 신뢰성을 분석하였다. 일반적으로 대상품에 온도 스트레스를 인가하여 가속수명시험을 실시하는 것은 많이 이용되는 방법이다. 따라서 본 원고에서는 온도 스트레스를 연기감지기에 인가하여 신뢰성을 분석하고 연기감지기의 가속수명시험에 대하여 고찰하였다.

2. 가속수명시험[4-10]

가속수명시험이란 가혹조건을 만들어 단기간에 고장을 일으킴으로써 실사용 조건에서의 수명을 예측하는 것을 말한다. 가속방법은 스트레스의 수준을 높여 고장을 유발하는 부식, 마모, 피로를 일으키는 것인데, 주로 온도, 습도, 전압, 압력 등의 수준을 올리는 방법을 사용한다.

가속수명시험의 기본적인 목적은 프로젝트 진행의 어느 시점에서(가능하면 빠른 시간에) 설계가 완성됐다는 것을 보여 주는 것이다. 이는 생산자가 소비자에게 시스템이 엄격한 환경하에서도 최소한 몇 시간 또는 며칠까지는 작동할 것인지 보여 주는 것이다. 따라서 가속수명시험의 개념이 나온 초기에는 이를 데모시험, 평가시험 또는 왈드 축차시험이라고도 하였다.

대부분의 현대 제품은 수년, 수십년 혹은 그 이상 고장이 없이 사용이 가능하도록 설계된다. 그러므로 통상 사용조건에서 실용적인 시험기간 내에 적절한 고장 또는 성능저하가 되는 제품은 거의 없다. 예를 들어 통신위성의 설계와 구조물은 10~15년 동안 서비스를 제공하기로 기대되는 부품을 시험하기 위하여 단지 8개월의 시험기간을 허용하고 있다. 즉, 가속수명시험은 특히 단순부품과 재료의 신뢰도 정보를 신속하게 얻고자 제조 기업에서 널리 활용되고 있다. 다양한 형태로 고장이 발생할 수 있는 복잡한 제품의 수명을 가속화하는 데는 실용적이고 통계적 측면이 어려운 문제점들이 존재한다. 가속변수의 낮은

2014방재기술56호-내지.ps 2014.7.3 9:35 AM 페이지15 mac2 XPose__cmyk 2400DPI 175LPI T

수준인 사용조건의 수명 또는 장기간 성능의 추정치를 구하기 위해서는 물리적 · 통계적 모형을 통하여 하나 이상의 가속 변수(온도, 압력, 사용률 등)의 높은 스트레스 수준에서의 시험결과 정보로부터의 외삽이 필요하다. 어떤 경우에는 스트레스를 시험과정 중에 증가시키거나 변경시킨다(단계-스트레스와 점진적-스트레스 가속시험). 가속시험의 결과는 부품과 하위시스템의 신뢰도 평가 또는 실증, 부품 인증, 수정 가능한 고장 모드의 발견, 경쟁품의 비교 등을 위해서 신뢰도 설계 과정에서 폭넓게 활용된다. 가속시험은 급변하는 기술, 더 많은 부품으로 이루어진 복잡한 제품, 보다 나은 신뢰도에 대한 소비자 기대의 증대, 그리고 빠른 제품 개발에 관한 필요성 등의 이유로 점점 중요한 시험방법이 되고 있다.

가속수명시험은 가속조건에서의 시험결과로 정상 사용조건에서의 신뢰성을 추정하고자 하는 것이지만 먼저 알아야 하는 것은 가속조건과 정상 사용조건 사이의 가속효과를 나타내는 가속계수이다. 가속계수(Accelerated factor, AF)는 정상 사용조건에서의 수명에 가속조건에서의 수명을 나눈 것으로 가속계수를 안다면 가속조건에서의 고장시간에 가속계수를 곱하여 정상 사용조건에서의 고장시간을 구할 수 있다.

가속수명시험을 위하여 가장 먼저 수행하는 것은 필드 고장모드 또는 고장 메커니즘을 파악하는 것이다. 가속수명시험에서 가장 먼저 해야 할 일은 필드 고장모드 및 고장메커니즘을 파악하는 일이다. 왜냐하면 가속수명시험을 통하여 궁극적으로 알고자 하는 것은 정상 사용조건에서의 신뢰성이므로 정상 사용조건과 다른 형태의 고장이 가속조건에서 발생한다면 가속수명시험을 진행하는 의미가 없어지기 때문이다.

필드에서 발생하는 고장 메커니즘이 파악되었으면 이를 가속시킬 수 있는 가속인자 또는 가속스트레스와 가속수준을 결정한다. 가속인자 또는 가속스트레스는 온도, 전압, 전류 등을 적절하게 선정해야 하고, 단일 가속 스트레스, 복합 가속 스트레스 등을 적절히 선정해야 한다.

다음은 시험조건을 결정하는 것으로 각 스트레스별로 2~3개의 수준을 선정하는 것이 일반적이다. 이렇게 시험조건이 결정되면 가속시험을 실시한다.

가속수명시험을 실시한 후에는 시험 중 고장 난 아이템에 대한 고장분석을 실시한다. 고장분석은 고장정보의 확인, 외관검사, 전기적 특성시험, 고장원인 추정, 비파괴분석 및 파괴분석 등을 이용한다.

다음 절차는 수명분포를 결정하는 것으로 수명을 나타내는 지수분포(Exponential distribution), 와이불분포(Weibull distribution), 정규(Normal distribution)분포 등이 있다. 수명분포를 결정한 후 가속성이 성립하는지 확인한 다음 사용조건에서의 수명을 추정하기 위해서 수명-스트레스 관계식을 결정한다. 가속수명시험에서 사용되는 대표적인 수명-스트레스 관계식은 아레니우스 모형, 역승 모형, 코핀-맨슨 모형, 아이링 모형 등이 있다. 이 중에서 아레니우스 모형은 가속스트레스가 온도인 경우에 가장 많이 적용되는 것으로 식 (1)과 같이 표현된다.

$$K = Ae^{\frac{E_a}{kT}} \quad \cdots\cdots (1)$$

여기에서 A : 상수
Ea : 활성화 에너지(eV)
k : 볼쯔만 상수$(=8.617\times10^{-5}\ eV/K)$
T : 온도(K)

가속수명시험의 다음 절차는 해당 고장데이터로 수명-스트레스 관계식을 결정짓는 모수를 추정하는 등의 수명-스트레스 모델링을 수행하고 가속계수를 산출하는 것이다.

본 원고는 온도 스트레스를 인가하여 연기감지기의 수명 등을 분석하는 것으로, 본 원고에서도 수명-스트레스 관계식은 이 아레니우스 모형을 이용하였다.

3. 연기감지기의 가속수명시험

소방시설물 중 화재감지기는 반영구적인 제품으로 신뢰성을 극도로 고양화하여 한번의 설치로서 건축물의 수명과 함께 하는 것으로 보는 경향이 있다. 그러나 화재감

2014방재기술56호-내지.ps 2014.7.3 9:35 AM 페이지16 mac2 XPose__cmyk 2400DPI 175LPI T

지기의 잦은 동작 Error 등에 따른 비화재보는 전체 화재감지시스템의 신뢰성을 문제로 여겨 심지어 화재감지시스템의 전원을 OFF시키는 경우도 있어 실제 화재시 대형 참사로 전이될 수 있는 여지가 있다.

본 원고는 화재감지기 중 연기감지기인 광전식감지기의 암실구조 개선을 통한 신뢰성 향상 연구이다. 광전식 연기감지기의 주요 고장메커니즘은 암실 챔버내에 먼지 등의 이물질에 의한 것이 가장 크고, 다음으로 내부 전자부품의 고장 등이다. 따라서 연기감지기의 개발품 내부에는 전자부품이 삽입되어 있기 때문에 가속시험을 이용한 신뢰성 향상에 대한 검증을 가장 널리 알려진 환경인자, 즉, 온도를 이용하였다.

가. 가속수명시험 조건

가속시험 온도를 이용한 가속시험 조건은 다음과 같다.

1) 필드 사용조건 : 15 ℃
2) 가속인자 : 온도
3) 시험온도 : 70 ℃, 90 ℃, 105 ℃, 120 ℃, 135 ℃, 150 ℃
4) 총 시료수 : 30개
5) 고장판단기준 : 화재감지기의 작동불능(일정 연기를 발생시켰을 때 일정시간 내에 감지하지 못함)

상기 조건에서 필드 사용조건을 15 ℃로 한 것은 우리나라 연평균 기온을 15 ℃로 가정한 것이고, 시험온도는 1차년도에는 단순히 3개 온도를 지정하였으나 화재감지기 중 열감지기의 가장 많이 사용되는 공칭작동온도는 70 ℃이기 때문에 70 ℃를 포함하여 15 ℃ ~ 20 ℃ 온도범위로 상승시켜 고장이 발생하기까지 시간을 관측하였다.

나. 가속수명시험 관측 중단

1차로 70 ℃, 90 ℃, 110 ℃의 3가지 온도조건에 시험체 10개씩을 각각 투입한 다음 1시간 경과시마다 작동신뢰성을 확인하였으나 단시간 내에 고장이 발생할 이상징후 등이 발견되지 않아 5시간마다 작동신뢰성을 확인하였다.

시험을 계속 실시한 결과 70 ℃ 및 90 ℃의 경우 800시간이 경과되어도 고장이 발생한 시험체가 없었고, 110 ℃의 경우 500시간이 경과되어도 고장이 발생한 시험체가 없어 관측 중단하였다.

다. 가속수명시험 결과 및 분석

Fig. 1. 온도가속시험장면 I

Fig. 2. 온도가속시험장면 II

Fig. 3. 90 ℃ 시험 후 시험체

2014방재기술56호-내지.ps 2014.7.3 9:35 AM 페이지17 mac2 XPose__cmyk 2400DPI 175LPI T

Fig. 1 및 2는 70 ℃ 및 90 ℃ 온도가속시험장면을 나타낸 것으로 이와 같이 온도에 노출 시킨 다음 자연대기 상태에서 일정시간 후에 화재감지기 작동신뢰성을 확인하는 시험장치로 작동신뢰성을 확인하였다. Fig. 3은 90 ℃의 온도조건하에 시험한 시험체를 나타낸 것으로 육안으로도 외함변형 등 이상이 없었고, 작동신뢰성을 확인한 결과 화재감지기로서의 고유 기능을 유지하고 있는 것으로 나타났다.

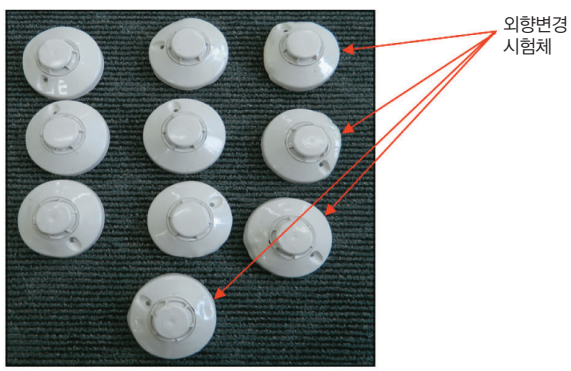

Fig. 4. 120 ℃에 20시간 시험 후 시험체

2차로 120 ℃, 135 ℃ 및 150 ℃의 온도조건으로 가속수준을 조정한 다음 각 온도조건에서 5개의 시험체를 이용하여 가속시험을 실시한 결과 120 ℃이상 온도의 경우 단시간에 외함변형 등이 발생되었다. 120 ℃에 노출된 시험체의 경우 120 ℃의 고온에 의하여 외함이 변형된 것을 육안으로 확인할 수 있었다. 또한 135 ℃ 및 150 ℃의 온도조건하에서는 단시간에 시험체의 변형이 발생하였다. 특히, 150 ℃의 온도조건에 넣은 시험체는 1시간만 경과되어도 외함의 변형이 발생하는 것으로 나타났다.

본 원고에서는 외함이 변형되는 것과 상관없이 수신부와 통신이상이나 작동신뢰성이 양호하면 외함의 변형이 심해도 정상으로 판정하였다. 이는 화재감지기는 일정시간동안 정상상태를 유지하면서 열기류 등에 외함 등이 변형되어도 화재신호를 발신하는 기능을 유지해야 하는 화재감지기 고유기능을 고려하였기 때문이다. 따라서 본 원고에서의 고장판정은 통신이상이나 화재발생 초기에 발생되는 일정 연기량에 작동하지 않는 경우로 한정하였다.

120 ℃, 135 ℃ 및 150 ℃에서 가속시험한 결과 120 ℃의 경우 100시간이 경과했을 때 시험체 외함이 심하게 변형되었으나 작동신뢰성이 양호하였고, 10 %/m의 연기농도를 표시해야 하는 연기량을 발생시켰을 때 표시되는 연기농도값은 8.93 %/m ~ 9.67 %/m로 매우 양호한 값을 나타냈다. 또한 최고 연기농도 표시값은 16.9 %/m ~ 19.7 %/m로 적정한 값을 표시하였다. 그러나 서서히 표시 연기농도값이 낮아지면서 194시간이 경과되었을 때 1개 시험체가 고장이 발생했고, 최종 216시간이 경과되었을 때 5개 시험체 모두 고장이 발생하였다. 또한 135 ℃의 온도조건하에 넣은 시험체는 고온에 의해 보다 단시간에 고장이 발생하였다. 150 ℃의 시험체의 경우에는 보다 고장나는 시점이 훨씬 단시간에 나타났다. 특히, 150 ℃의 온도조건에 넣은 시험체는 3시간이 경과된 시점부터 연기농도 표시값이 10 %/m를 표시해야 하는 연기농도를 발생시켰을 때 작동한계값을 표시하는 시험체도 있었으나 화재신호를 발신하는 기능에는 이상이 없는 것으로 나타나 고장으로 판정하지 않았다.

이러한 온도에 따른 고장시간을 통하여 수명분포의 적합성을 검정한 결과 Fig. 5와 같이 나타났다. Fig. 5에서 보듯이 각 분포별로 적합성을 나타내는 Anderson-Dalring값이 가장 낮은 것은 Weibull분포로 본 연구의 가속수명시험 데이터는 Weibull분포가 가장 적합한 것으로 나타났다.

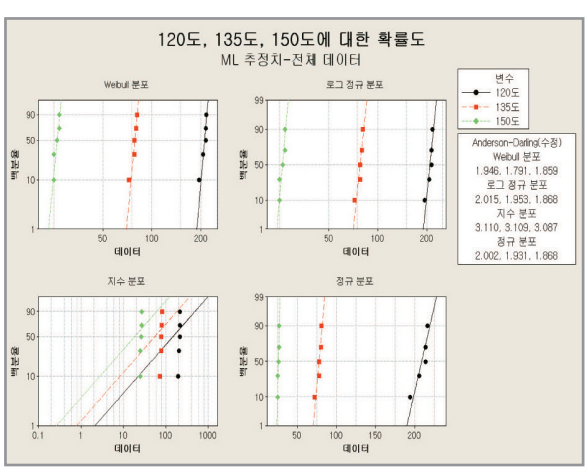

Fig. 5. 분포적합성 분석 결과

2014방재기술56호-내지.ps 2014.7.3 9:35 AM 페이지18 mac2 XPose__cmyk 2400DPI 175LPI T

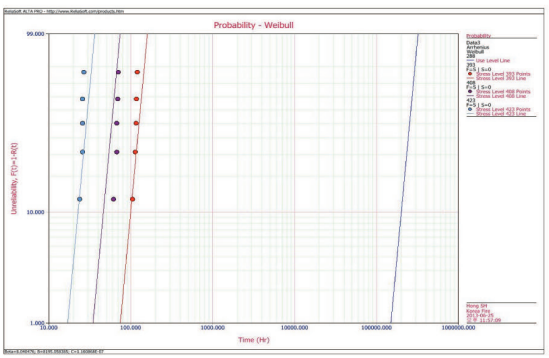

Fig. 6. 시험데이터의 Weibull 확률지 타점

Fig. 6은 Weibull 확률지에 타점한 가속시험데이터를 나타낸 것으로 각 온도 스트레스에 따라 직선적으로 타점되어 있고, 수명분포 추정선이 평행한 것을 볼 수 있다.

가속수명시험에서 중요한 것 중에 하나는 주어진 가속조건의 가속성이 성립하는 것을 확인하는 것이다. 가속성이 성립하는 것을 확인하는 것은 수립한 가속수준에서의 고장과 일반 사용조건에서의 고장이 동일한 것을 확인하는 과정이다. 가속성이 성립하는 가를 확인하는 방법은 와이블 확률지와 같은 확률지에 적합시킨 회귀선의 기울기가 서로 평행한지를 확인하는 방법과 형상모수가 동일한지를 통계적인 가설검정 절차를 거쳐서 확인하는 방법이 있다. 2가지 방법 모두를 이용하여 분석한 결과 본 원고의 온도 가속수명시험 데이터는 가속성이 성립하는 것으로 나타났다.

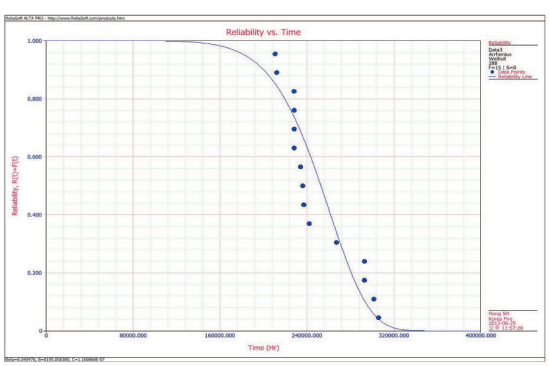

Fig. 7. 시간에 따른 신뢰성 변화도

Fig. 7은 시간에 따른 신뢰성 변화를 나타낸 것으로 약 200,000시간까지는 신뢰성이 비교적 양호하다가 200,000시간 이후에 신뢰성이 급격히 감소되는 것을 알 수 있다. 따라서 온도 가속시험 결과만은 고려할 때 본 연구와 같은 광전식 연기감지기는 200,000시간이후에는 신뢰성이 낮아져 화재감지기로서의 역할을 기대하기 어렵다는 결과를 알 수 있다.

평균수명을 계산한 결과 본 연구의 온도 가속시험 결과를 이용하여 평균수명을 계산한 결과 약 28.5년으로 나타났다. B_{10}수명은 보다 짧게 계산되겠지만 이 평균수명을 고려한다면 약 28.5년의 수명을 보증하는 것으로 간주할 수 있다. 또한 활성화에너지를 계산한 결과 활성화에너지는 0.706 eV로 계산되었고, 이 활성화에너지를 이용하여 가속계수를 계산할 수 있다. 가속계수는 아래 식 (2)를 통하여 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{t_1}{t_2} = e^{\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_1}-\frac{1}{T_2}\right)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

여기에서 Ea : 활성화에너지(eV)

k : 볼쯔만상수$(=8.617\times10^{-5}\ eV/K)$

$T_1\ T_2$: 각 가속조건의 온도

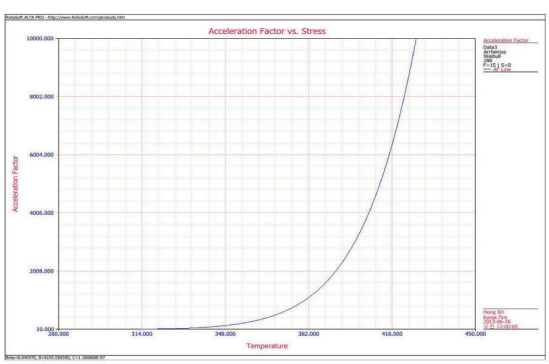

Fig 8. 온도 스트레스에 따른 가속계수

Fig. 8은 각 온도 스트레스에 따른 가속계수를 나타낸 것으로 온도가 약 390 K 이상이 되면 가속계수가 2,000 이상이 되는 것을 확인할 수 있다.

온도가 약 416 K가 되면 가속계수는 6000이 넘는 것으로 나타났다. Table 1은 온도를 이용한 가속수명시험 데이터를 요약한 것을 나타낸 것이다.

2014방재기술56호-내지.ps 2014.7.3 9:35 AM 페이지19 mac2 XPose__cmyk 2400DPI 175LPI T

Table 1. 온도 가속수명시험 데이터 요약

Cable	120 ℃	135 ℃	150 ℃
형상모수		30.8	
척도모수	117.4	69.1	26.1
완전고장시간	121	71	27
가속계수	2,003	4,312	8,790
활성화 에너지		0.706 eV	

4. 맺음말

본 원고는 신뢰성 시험방법 중에 널리 사용되고 있는 가속수명시험을 이용하여 연기감지기의 신뢰성을 분석한 것이다. 가속수명시험의 가속인자는 온도이고, 가속수준은 1차로 70 ℃, 90 ℃ 및 105 ℃, 2차로 120 ℃, 135 ℃ 및 150 ℃의 각각 3수준을 인가하였다. 1차로 인가한 가속수준의 경우 일정시간이 경과하여도 고장이 발생하지 않아 관측중단 후 더 높은 가속수준인 2차 가속수준을 인가하였다.

가속시험 결과 시험체 모두가 완전 고장이 발생하는 시간은 120 ℃의 경우 121시간, 135 ℃의 경우 71시간, 150 ℃의 경우 27시간으로 나타났다. 이 고장시간을 이용하여 분포적합성 분석을 실시한 결과 본 원고의 데이터는 와이블 분포에 적합한 것으로 나타났다. 또한 신뢰성 분석결과 약 200,000시간까지는 신뢰성이 양호한 것으로 나타났으나 이 시간이 경과된 이후에는 신뢰성이 급격하게 감소하는 추세를 보였다.

본 원고에서는 온도 스트레스를 이용하여 연기감지기의 신뢰성을 분석하였으나 연기감지기는 분진, 습도, 전기적 스트레스 등의 다른 스트레스 요인에 의한 영향이 더 클 수 있다. 향후 온습도를 포함하여 전기적 스트레스 등의 복합 가속인자를 인가하는 가속수명시험을 수행하여 수명을 예측한다면 보다 정확하게 연기감지기의 신뢰성을 분석할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김재중, "가속수명시험과 사례", 기계저널, Vol.49, No.12, pp.60~64, 2009
2. 유동수, 김상욱, 장영기, 문철희, "냉장고 도어스위치의 가속수명시험", 한국신뢰성학회지, Vol.5, no.2, pp.273~287, 2005
3. 손영갑, 장현정, "가속수명시험을 이용한 원샷 시스템의 신뢰도 추정방법 비교", 대한산업공학회지, Vol.36, No.4, pp.212~218, 2010
4. 백재욱, 가속수명시험, 에피스테메, pp.75~86, 2007
5. 신승훈, 와이블 차트와 가속시험, 과학기술, pp.101~116, 2003
6. Guikema S. D., "A Comparison of Reliability Estimation Methods for Binary Systems, Reliability Engineering and System Safety", Vol.87, pp.365~376, 2005
7. Steven C. C. and Canale R. P. Numerical Methods for Engineers, McGraw Hill, 2008
8. 정해성, "가속수명시험의 최적 설계", 한국신뢰성학회지, Vol.7, No.2, pp.57~72, 2007
9. 오준식외 3인, "TRV Factor변화에 의한 저압개폐기의 전기적 가속수명시험", 대한전기학회 EMECS 학회 추계학술대회논문집, pp.91~92, 2007
10. 유행수, 한규환, 권영일, "배전선로에 사용되는 전자개폐기(Magnetic Switch)의 가속수명시험에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2002