

VFD(Vacuum Fluorescent Display) 가속열화시험 응용사례

배 석 주
한양대학교 산업공학과

Application of Accelerated Degradation Testing for VFD (Vacuum Fluorescent Display)

Suk Joo Bae
Department of Industrial Engineering, Seoul, Korea

Abstract

As an alternative to traditional life testing, degradation tests can be effective in assessing product reliability when measurements of degradation leading to failure can be observed. This article presents an accelerated degradation testing for vacuum fluorescent displays (VFDs). The accelerated degradation model is based on Arrhenius-lifetime relationship for cathode temperatures. We compare the results between accelerated degradation test and test at normal use condition. Accelerated degradation test for display devices is observed as an efficient method to warrantee product reliability to customers, as well as a tool to save time and costs.

1. 서론

더욱 복잡해져 가는 제조기술과, 날로 증가하는 소비자의 기대, 그리고 소비자 보호운동의 영향으로 인해 제품수명에 대한 중요성이 계속적으로 증가하고 있다. 보통 제품의 수명은 설

계공정이나 제조공정에서 결정되게 되는데, 수명시험 자료를 분석, 제품의 수명을 평가하게 된다. 수명 데이터를 분석한 후에 제품고장 비용을 예측하여 전반적인 제품보증 활동에 반영할 수 있고, 또한 품질관리나 합격판정샘플링 (acceptance sampling)에 대한 유용한 정보를 얻을 수 있기 때문에 반도체 산업을 포함한 많은 전자산업 분야에서 제품 수명시험에 대한 중요성이 강조되고 있다.

그러나 수명시험을 수행하여 제품 고장에 대한 정보를 얻고자 할때, 고신뢰성의 제품을 일반적인 설계조건하에서 시험하는 것은 짧은 시간동안 고장이 날 확률이 매우 작고, 설사 고장 데이터를 얻는다 하더라도 초기고장 분포에 대한 정보만을 반영하기 때문에 좋은 방법이라고 할 수 없다. 이를 보완하기 위해 가속수명시험 (Accelerated life testing)을 사용하는데, 가속수명시험은 정상사용조건보다 가혹한 스트레스를 제품에 가함으로써 제품고장을 촉진시킨 후 통계적인 기법을 사용하여 정상사용조건에서의 고장시간을 외삽(extrapolation), 수명을 예측한다. 가속수명시험은 시간과 비용을 절약할 수 있기 때문에 제조현장 및 연구소에서 널리 사용되고 있다.

대부분의 신뢰성 시험에 있어 고장 데이터는 하나 혹은 여러 시간 지점에서의 제품 마모를 측정된 열화(degradation) 데이터와 함께 얻어질 수 있다. 최근에 기업들의 고신뢰성의 제품 개발의 노력과 그 결실로 인해 신뢰성이 크게 향상되어 가속조건에서 시험을 수행한다 하더라도 고장 데이터를 충분히 얻지 못하는 경우가 많아 열화 데이터의 측정 및 새로운 분석방법을 제조기업들이 많이 필요로 하고 있다. 따라서 본연구에서는 VFD(vacuum fluorescent display)의 가속열화시험 자료를 토대로 정상조건에서의 제품수명을 예측하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 가속열화시험 모델

2.1. 가속열화시험모델

VFD 혹은 cathode ray tube(CRT)등 디스플레이의 휘도는 열전자의 방출에 따른 절대전자량의 감소로 인해 시간에 따라 지수적으로 감소한다고 알려져 있다 (Tannas, 1985). 따라서 대수로그 변환된 성능 $\mu(t)$ 에 대하여 VFD 휘도는 시간 t 에 대한 다음과 같은 선형모형이 가정될 수 있다:

$$\mu(t) = \beta_0 - \beta_1 t \quad (1)$$

이때 $\mu(t)$ 는 (로그)성능의 모분포에 대한 평균 혹은 중위값(median)으로 정의될 수 있다. 절편계수 β_0 는 시간 0에서의 (로그)성능값을 나타내며, 회귀직선의 기울기 β_1 는 열화율을 나

타내며 시험시간동안 일정하다고 가정할 수 있다. 열화율 상수 β_1 는 인가하는 스트레스의 함수로서 스트레스 조건에 따라 변하게 된다. 전형적인 성능, 즉 $\beta_0 \exp(-\beta_1 t)$ 는 시간 t 에 따라 지수적으로 감소하게 되며, $\beta_0 = \exp(\beta_0)$ 는 초기열전자량으로 표현되는 상수이다. 만약 성능이 시간에 따라 증가하는 열화경로를 나타내고자 할 때는 (-) 대신에 (+)를 사용한다.

만약 (로그)성능이 “soft failure” 라고 불리는 미리 규정한 수준 μ_f 에 도달하였을 때 고장난다고 하면, 고장시간 t_f 는 다음과 같이 구할 수 있다:

$$t_f = (\beta_0 - \mu_f) / \beta_1 \tag{2}$$

열화모델 (1)은 가속열화 데이터에 대하여 성능열화와 가속변수에 대한 관계를 나타낸다. 만약 온도가속인 경우 열화모델의 열화율 β_1 은 절대온도 T 의 함수로서 일반적으로 Arrhenius 관계식에 의해

$$\beta_1 = \beta \exp(-\gamma/T) \tag{3}$$

으로 표현되며, β 와 γ 는 제품이나 열화프로세스의 특성을 나타내는 상수이다. (3)을 (1)에 대입하여

$$\mu(t, T) = \beta_0 - t \cdot \beta \exp(-\gamma/T) \tag{4}$$

이며, 고장시간 t_f 는

$$t_f = [(\beta_0 - \mu_f) / \beta] \cdot \exp(\gamma/T) \tag{5}$$

가 된다. 수식 (5)는 가속수명시험(ALT)에서의 제품수명에 대한 Arrhenius 관계식과 일치하며, 고장시간 t_f 는 시료에 따라 산포를 가지기 때문에 확률분포로써 나타낼 수 있다. 수명 분포에 대하여 만약 어떠한 분포(예를 들면, Weibull, 대수정규분포)를 가정한다고 하면, 분포의 백분위수(percentile)는 모델의 모수로써 나타낼 수 있으며, 또한 스트레스의 함수로 표현 가능하므로, 정상조건에서의 수명을 외삽(extrapolation)할 수 있게 된다. 자세한 내용은 Nelson(1990) 및 윤상운(1994)을 참고하기 바란다.

2.2. Arrhenius-수명분포 관계식

Arrhenius-대수정규분포 관계식은 대수정규 수명분포와 온도에 대한 수명의 Arrhenius 관계를 나타낸다. Arrhenius-대수정규모형의 기본전제는

- 1) 절대온도 T 에 대하여, 제품수명은 대수정규분포를 따른다. 즉 로그변환된 수명에 대한 분포는 평균이 μ , 분산이 σ^2 을 따르는 정규분포이다.
- 2) 대수수명의 표준편차, 즉 척도모수(scale parameter)는 상수이며, 절대온도에 대하여 독립적이다.
- 3) 대수변환된 수명의 평균은 절대온도 T 의 역(inverse)에 대한 선형함수이다. 즉,

$$\mu(t, T) = \gamma_0 + \gamma_1/T.$$

여기에서, 모수 γ_0, γ_1 는 VFD 시험방법에 대한 특성을 나타내는 상수로서, 시험데이터로부터 추정되어진다. 절대온도 T 에서 수명 t 에 대한 누적분포함수(cumulative density function: cdf)는

$$F(t, T) = \Phi[(\log(t) - \mu(t, T))/\sigma]$$

와 같으며, $\Phi[\]$ 는 표준정규 누적분포함수이다.

Arrhenius-와이블 관계모형에 대한 기본가정은

- 1) 절대온도 T 에 대하여, 제품수명은 와이블분포를 따른다. 와이블분포의 누적분포함수(cdf)는

$$F(t) = 1 - \exp[-(\frac{t}{\eta})^\kappa]$$

이며, $\eta(>0)$ 는 척도모수로서 특성수명(characteristic life), 즉 63.2 사분위수를 나타내며, $\kappa(>0)$ 는 형상모수로서 $0 < \kappa < 1$ 일때 감소고장율을 나타내며, $\kappa > 1$ 일때 증가고장율을 나타낸다. $\kappa = 1$ 일때 고장율은 일정하며, 와이블분포는 지수분포가 된다.

- 2) 와이블분포의 형상모수는 일정하며, 절대온도에 대하여 독립적이다.
- 3) 와이블 특성수명의 대수치는 절대온도 T 의 역(inverse)에 대한 선형함수이다. 즉,

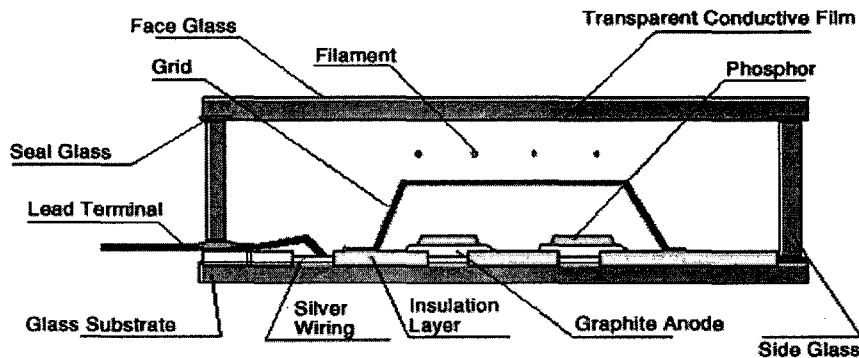
$$\xi(T) = \log[\eta(T)] = \gamma_0 + \gamma_1/T.$$

여기에서, 모수 γ_0, γ_1 는 Arrhenius-대수정규 관계모형과 마찬가지로 VFD 시험방법에 대한 특성을 나타내는 상수로서, 시험데이터로부터 추정되어진다.

3. VFD 가속열화시험

3.1. VFD의 기본구조

VFD는 Triode 진공관(vacuum tube)의 한 종류로서 다색 표시(Multi-Color)가 용이하고, 또한 자발광하기 때문에 시인성이 뛰어나다. 또한 시야각이 뛰어나며, 저전압으로 구동이 가능하기 때문에 부품의 적용이 쉬워 여러 분야에서 다용도로 사용되고 있다. VFD는 3가지의 기본 전극: 캐소드(Cathode), 애노드(Anode), 그리고 그리드(Grid)로 구성되어 있으며, 일반적인 VFD의 기본구조는 <그림 1>과 같다.



<그림 1> VFD의 기본구조

VFD 전극의 역할과 동작특성에 대하여 설명하면

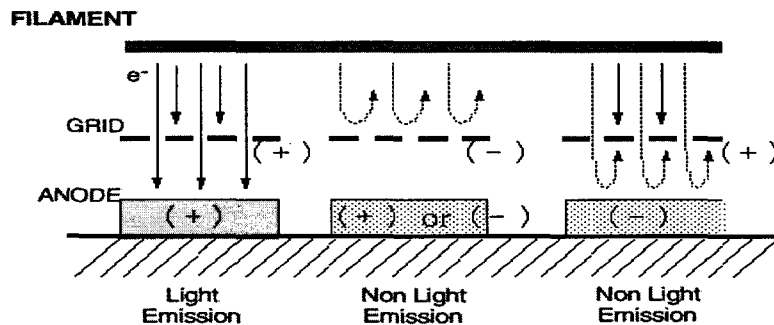
- 캐소드 (Filament): 필라멘트(filament)는 barium oxide로 코팅되어 있는 순수한 텅스텐 소재의 와이어(wire)이며, 사용하는 동안 캐소드는 필라멘트로부터 가열되어 열전자를 방출한다.
- 애노드: 애노드는 하나의 세그먼트(segment) 혹은 도트 형태의 전도성 전극이며, 표면 위에 문자, 숫자, 상징 혹은 어떠한 아이콘을 표시하는 형광체가 도포되어 있다.
- 그리드: 그리드는 스테인레스 강의 박막으로 거북이 등껍질 (formed tortoise shell) 혹은 라티스(lattice) 형태로 되어있다.

VFD의 동작원리를 <그림 2>를 토대로 간단히 설명하면, 필라멘트에 의해 가열되어진 캐소드의 열전자는 그리드와 애노드에 가해진 양전위에 의해 가속되어 애노드위의 형광체와 충돌, 자극하여 빛을 발하게 된다. 이때, 원하는 발광패턴은 각각 그리드와 애노드위의 양전위나 음

전위를 조정하여 표시되어진다. 그리드는 전자의 흐름을 조정하며, 만약 양전위가 그리드에 가해지면 전자는 에노드를 향하여 가속되며, 에노드 전압을 가함으로써 디스플레이 세그먼트(segment)를 on시키며, 교류전압은 균일한 밝기를 확보하기 위하여 사용된다.

3.2. VFD 회도의 열화

설계상의 특성으로 인해, VFD는 사용하면서 시간이 지남에 따라 점차적으로 열화하게 되며, 수명은 VFD 캐소드의 열화효율에 기인한다. 일반적으로 VFD 제조업체는 규정된 범위의 동작 전기수준(electric rating)에 사용할 것을 권하고 있으며, 수명은 가해진 필라멘트 전압(Ef)에 의해 크게 좌우된다. 열화정도는 높은 필라멘트 전압을 가할수록 가속되어지며, 이는 가열된 필라멘트가 한정된 양의 캐소드내 전자방출을 촉진함에 기인한다. 방출되는 열전자 수는 사용하면 할수록 줄어들며, 결국 디스플레이 품질을 열화시키게 된다.



<그림 2> VFD의 동작원리

일반적인 사용조건하에서 수명은 약 80,000~100,000시간이 보편적이며, 어떤 VFD 모델은 설계를 변형함으로써 약 300,000시간까지 수명을 연장시킬 수 있다. VFD 제품 사용 사이클은 매우 짧아서(약 6~12개월), 장시간동안 수명시험을 시행하는 것은 수명시험 도중에 모델이 바뀔수 있기 때문에, 큰 의미가 없다. 따라서 일반적인 사용조건하에서 수명시험을 실시하는 것은 VFD의 수명을 예측하기에 적합하지 않으며, 보통 필라멘트에 정상조건(Ef=3.5V)보다 높은 전압을 인가, VFD의 (회도)성능열화를 가속시켜 수명을 단축시킨 후에 사용조건하에서 수명을 예측하는 가속열화시험을 사용하고 있다.

3.3. VFD 가속열화시험

VFD 회도수명을 예측하기 위하여 사용조건 및 가속조건에서 수명시험을 실시하였다. 일반적인 사용조건에서의 수명시험은 고객에 대한 보증목적을 위해 실시되며, 1,000시간동안 초기대비 70% 회도를 만족해야 한다. Bae 와 Kvam(2004)은 정상조건에서의 비선형형태로 나타나는 VFD 열화경로에 대해 적합한 모형을 제시하였으며, 그에 따른 VFD 수명을 예측하였다. 그러나 사용조건에서의 시험은 열화가 빨리 진행되지 않아 보통 수명(회도 초기대비 50% 감소할때까지의 시간으로 정의)을 예측하기가 힘들며, 따라서 VFD의 평균고장시간

(mean time to failure: MTTF)를 예측하기 위하여 가속조건에서 열화시험을 실시하였다. 본 논문에서는 가속열화시험을 중심으로 설명하기로 한다.

본시험에서는 VFD 휘도열화를 가속시키기 위해 일반적인 사용조건보다 더 높은 필라멘트 전압을 3가지 조건에서 인가하였다. VFD나 CRT의 경우 필라멘트 전압(Ef)을 증가시키면 그에 따라 캐소드 온도(Tk)가 상승, 열전자의 방출이 촉진되기 때문에 실제적인 스트레스 조건은 필라멘트 전압(Ef)이 아니라 캐소드 온도(Tk)라고 볼 수 있다. 따라서 정확한 분석을 위하여 각각의 필라멘트 전압(Ef)에 상응하는 캐소드온도 (Tk)를 시료마다 측정, 평균값을 구하였다. 시험조건 및 평균 Tk값이 <표 1>에 요약되었다.

<표 1> VFD 가속열화시험조건

필라멘트 전압(Ef)	캐소드 온도(Tk)	시료수
4.20V	680oC	7
4.55V	708oC	8
5.25V	770oC	10

VFD의 휘도는 시험기간동안 지수적으로 감소한다고 알려져 있으며, 따라서 열화모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다:

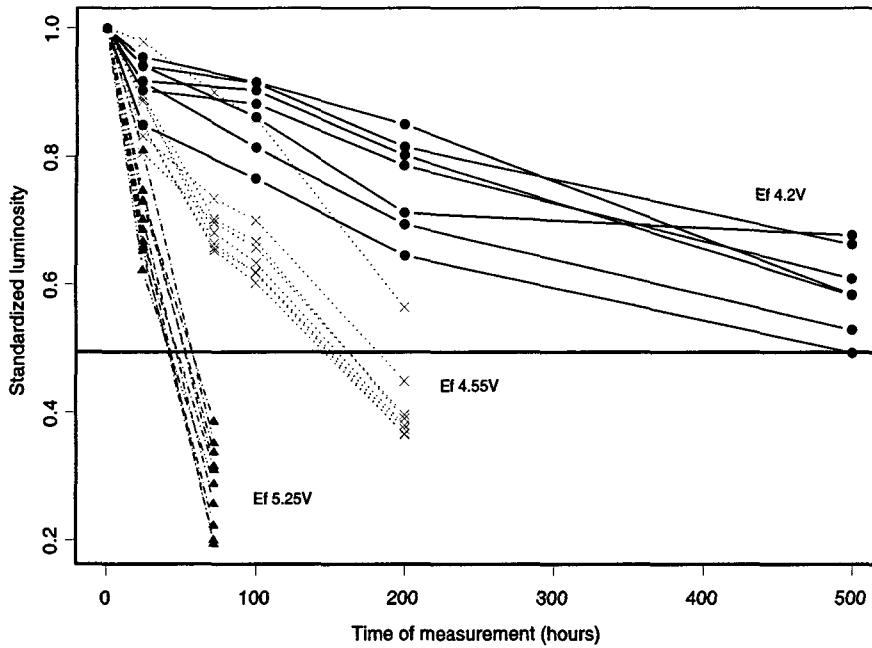
$$y(t) = \beta \exp(-\lambda t)$$

이때 $y(t)$ 는 시간 t 에서의 휘도를 나타내며, β 는 초기휘도를, $\lambda (>0)$ 는 휘도 열화율을 나타내는 상수이다. 로그변환후, 휘도열화모델은

$$D(t) \equiv \log y(t) = \log \beta - \lambda t$$

$$= \beta_0 + \beta_1 t, \quad \beta_1 < 0$$

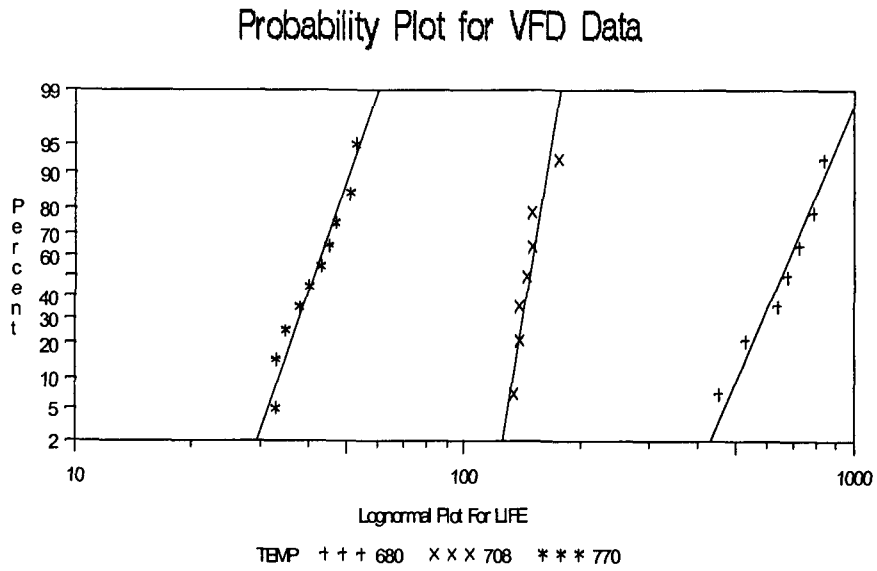
이 된다. <그림 3>은 3가지 필라멘트 전압에서의 열화경로를 나타내며, 휘도수명 예측을 보다 용이하게 하기 위해 각시간대의 휘도를 초기휘도로 나눈 표준화휘도를 나타내었다. 이때 수명은 초기대비 50% 감소할때까지의 시간(선으로 표시)이 된다.



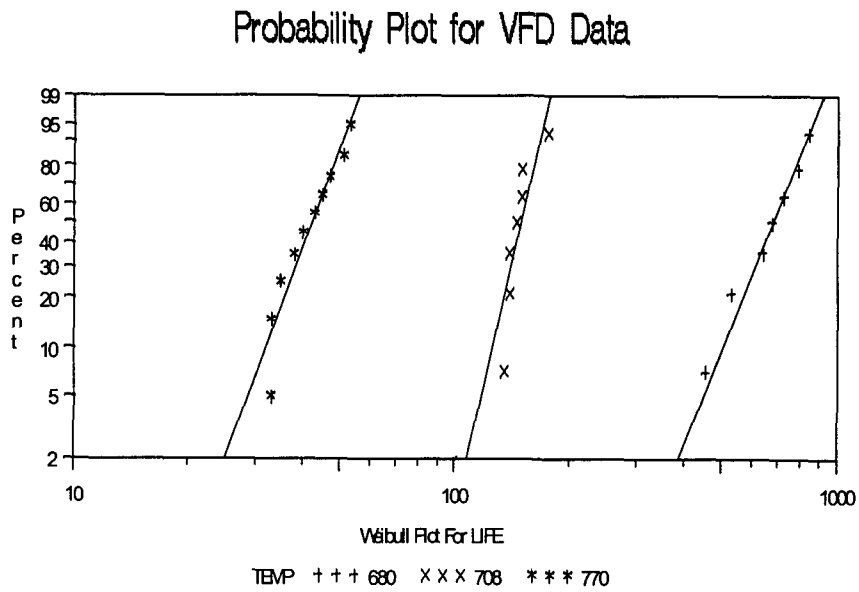
<그림 3> VFD 가속열화경로

각 열화경로에 대한 수명데이터를 구하기 위해 모든 열화경로에 대하여 독립적으로 단순회귀모형을 적합하여 절편, 기울기를 구한다음 식 (2)를 토대로 고장시간을 추정하였다. 본 연구에서는 열화데이터를 모형화하기 위하여, 2가지 유형의 스트레스-수명모형을 고려하였는데, 캐소드 온도에 대하여 Arrhenius-대수정규 관계모형과 Arrhenius-와이블 관계모형이다.

먼저, 수명-스트레스 관계모형에 대한 기본가정이 옳은지를 검토되어야만 한다. 아래 <그림 4>와 <그림 5>는 각 스트레스 수준에서의 수명데이터에 대한 대수정규 및 와이블 확률그림(probability plot)으로서 SAS QC 프로시저를 사용하여 나타냈다.



<그림 4> VFD 가속열화시험데이터의 대수정규분포 적합



<그림 5> VFD 가속열화시험데이터의 와이불분포 적합

대수정규분포와 와이불 확률그림에서 3 직선이 각 온도수준에 대하여 거의 평행하게 나타나 있는데, 대수정규분포 척도모수(대수정규 확률그림에서 기울기)와 와이불 형상모수(와이불 확률그림에서 기울기)가 상수이라는 가정 2)가 각각 만족되어짐을 알 수 있다. 또한 모든

데이터가 직선부위에 분포하는 것으로 미루어 수명데이터의 분포로서 대수정규분포와 와이불 분포가 적합함을 알 수 있다.

대수정규분포와 와이불분포를 토대로 절대온도에 대한 Arrhenius-수명관계식을 적합하였다. <그림 6>의 왼쪽그림은 데이터의 대수정규분포 확률그림을 나타내며 직선은 적합된 모형을 나타낸다. <그림 6>의 오른쪽 그림은 대수정규분포를 토대로 수명데이터와 Arrhenius 관계식을 나타낸 것으로서, 적합된 점선은 50 백분위수(percentile)를, 실선은 각각 10, 90 백분위수(percentile)을 나타낸다. 백분위수는 전체시료중 그 %에 해당하는 시료가 고장나는 시점을 의미한다. 예를 들면, 50 백분위수이라 함은 만약 100개를 시험한다고 하면, 전체 50%(50개)가 고장나는 시간을 의미한다. 캐소드의 절대온도(캐소드 온도 + 273oC) T 에 대하여 Arrhenius-대수정규 관계식을 적합시켰을때 대수변환된 수명의 평균

$$\mu(t, T) = -23.856 + 28.675/T$$

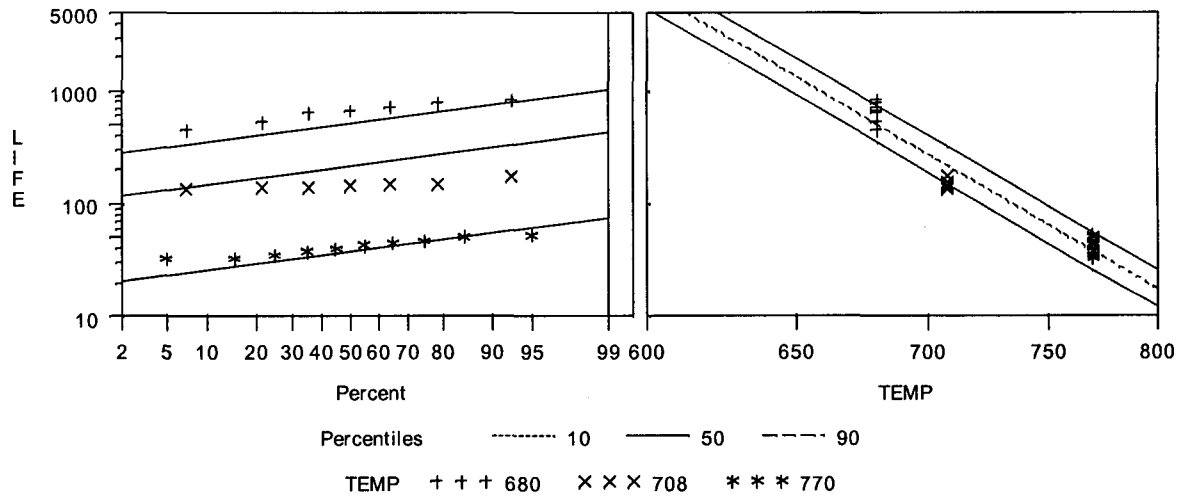
이며, 표준편차(척도모수)는 각 캐소드 온도조건에서 일정하다는 가정하에서 $\sigma = 0.2964$ 로 추정되었다.

한편 <그림 7>은 데이터의 와이불분포 확률분포(왼쪽)와 Arrhenius-와이불 관계모형(오른쪽)을 나타내고 있다. 캐소드의 절대온도 T 에 대하여 Arrhenius-와이불 관계식을 적합시켰을때 와이불 특성수명의 대수치

$$\xi(T) = \log[\eta(T)] = -24.938 + 29.90/T.$$

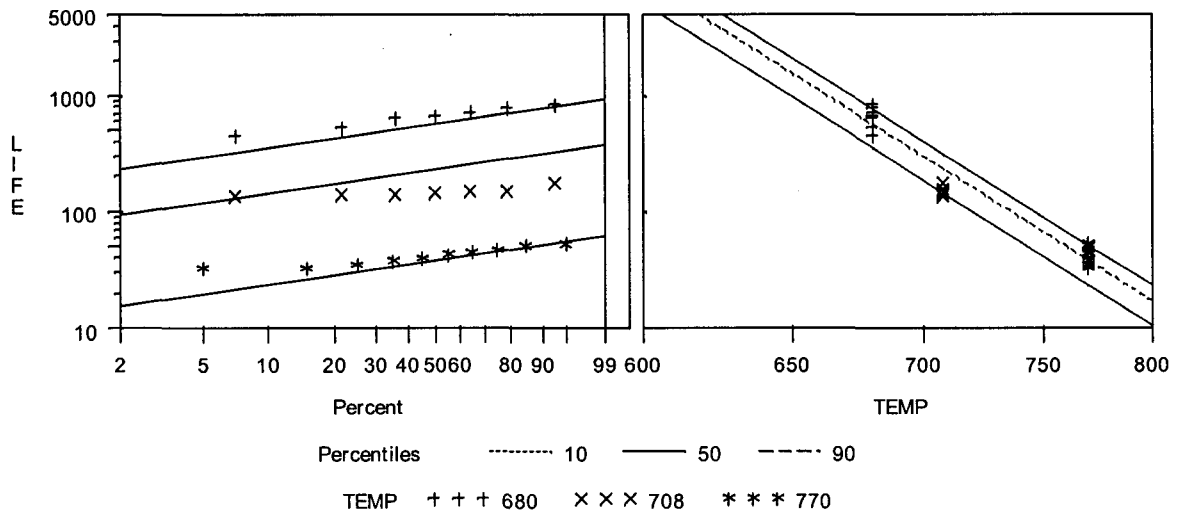
이며, 형상모수 $\kappa = 3.957$ 로 추정되었다. κ 가 1보다 크므로 고장율은 시간에 따라 증가하며, 이는 VFD의 휘도에 대한 고장이 주로 캐소드 열화에 의해 정의되기 때문에 시간에 따라 고장이 늘어난다고 볼 수 있다.

lognormal Relation Plot for VFD data



<그림 6> Arrhenius - 대수정규 관계모형 그림

Weibull Relation Plot for VFD data



<그림 6> Arrhenius - 와이불 관계모형 그림

스트레스-수명관계식의 추정된 계수를 토대로 정상사용조건, 즉 $E_f=3.5V$ 에 상응하는 캐소드 평균온도($620^{\circ}C$)에서의 수명이 추정되었다. 본 논문에서는 가속열화시험의 타당성을 검토하기 위해 수명-스트레스 관계모형으로부터 정상사용조건에서의 수명을 예측한 결과와 실제 사용조건에서 열화시험을 실시한 결과를 서로 비교하였다. 실제 사용조건 ($E_f=3.5V$)에

서의 수명은 5개의 VFD 시료의 절편, 기울기를 각각 추정, 초기대비 50% 감소할때까지의 시간을 각각 구하였으며, 이 수명데이터를 대수정규 및 와이불 분포에 적합하여 백분위수를 추정하였다. 수명 백분위수를 비교한 결과는 <표 2>와 같으며, 백분위수와 더불어 개개의 백분위수에 대한 표준오차(standard error) 및 표준오차를 이용하여 구한 백분위수의 95% 신뢰구간을 함께 제시하였다.

<표 2> 정상사용조건에서의 VFD 휘도수명 백분위수 예측결과

		대수정규분포		와이불분포	
		정상조건	스트레스-수명 관계식	정상조건	스트레스-수명 관계식
10	백분위수	2337	2523	2259	2783
	95% 신뢰구간	[1964, 2778]	[1714, 3714]	[1728, 2952]	[1922, 4032]
	표준오차	51.81	497.80	71.62	526.17
50	백분위수	2819	3689	2889	4481
	95% 신뢰구간	[2479, 3204]	[2544, 5348]	[2523, 3311]	[3336, 6018]
	표준오차	49.73	699.14	47.93	674.36
90	백분위수	3400	5393	3383	6069
	95% 신뢰구간	[2860, 4044]	[3663, 7939]	[2890, 3875]	[4579, 8043]
	표준오차	86.93	1064.10	85.70	872.23

정상사용조건에서의 열화시험 결과 추정된 10 백분위수와 가속열화시험의 수명-스트레스 관계식을 토대로 도출된 10 백분위수를 비교하였을 때, 대수정규분포와 와이불분포에서 그 값이 거의 비슷하게 나오며, 따라서 가속열화시험으로부터의 수명예측이 타당하다고 볼 수 있다. 하지만, 90 백분위수를 비교하였을 때, 정상 스트레스 조건에서의 시험과 가속열화시험으로부터의 그 결과가 차이가 나며, 수명-스트레스 관계모형에서의 백분위 수명 추정값이 더 높게 나왔다. 그러나, 고객보증 측면에서 10 백분위수, 즉 전체시료중 10%가 고장나는 시간이 90 백분위수보다 훨씬 더 중요한 지표로서 관리되어야 하기 때문에, 정상사용조건에서 열화시험을 실시하는 것보다 보다 빠른 시간안에 수명을 예측할 수 있는 가속열화시험을 실시하도록 권장된다. 또한 대수정규 백분위수 값이 와이불 백분위수 값보다 훨씬 더 정상사용조건에서의 수명예측치와 근사하므로 VFD 수명데이터에 대하여 와이불분포보다는 대수정규분포를 추후 사용할 것을 권장한다.

4. 결론

VFD 휘도 열화과정은 캐소드 내부의 전자량이 한정되어 있으므로 시험을 진행할 수록 전자량이 소모, 사용할 수 있는 절대 전자량이 감소한다. 따라서 높은 필라멘트 전압(Ef)을 인가

하면 전자량 방출량이 증가하기 때문에 본 논문에서는 가속 스트레스로 사용될 수 있다. 하지만 실제적인 스트레스 조건은 필라멘트 전압(E_f)이 아니라 캐소드 온도(T_k)이기 때문에 본 논문에서는 온도-수명관계의 대표적 모형으로서 Arrhenius-수명관계 모형을 통해 정상사용 조건에서의 수명을 예측하였다.

가속열화시험 실시후 Arrhenius-대수정규 관계모형으로부터 추정된 평균수명은 정상사용 조건에서의 열화수명 실시 후 추정된 평균수명과 비교할 때 그 차이가 크지 않으며, 따라서 가속열화시험을 수행하면 빠른 시간안에 수명검증을 할 수 있어 시간 및 비용을 절감할 수 있다. 또한 수명문제점을 사전에 미리 파악 설계부분에 피드백 할 수 있고 고객의 클레임에 보다 신속하게 대응할 수 있으므로 디스플레이 업계에서는 자사 이윤 극대화를 위해 가속열화시험을 지속적으로 사용할 것을 권장한다.

일반적으로 캐소드 온도(T_k)를 측정하기 위해서는 정밀한 thermometer가 필요하며, 측정 기술 또한 고도의 기술 및 시간을 요한다. 따라서 필라멘트 전압으로서 수명-스트레스 관계를 설명하는 Power-수명관계모형을 고려할 수 있는데, 캐소드 온도에 대한 arrhenius 모형 보다 정확하지는 않지만 현장에서는 보다 손쉽게 적용할 수가 있기 때문에 추후 그 모형에 대한 개선방법 등을 따로 연구해 볼 필요가 있으리라 판단된다.

5. 참고문헌

- [1] 윤상운(1994), 가속화신뢰도 분석, 1판, 자유아카데미.
- [2] Bae, S. J., & Kvam, P. H. (2004), A Nonlinear Random-Coefficients Model for Degradation Testing, Technometrics, Vol. 46, 460-469.
- [3] Nelson, W.(1990), Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans and Data Analysis, Wiley, New York.
- [4] Tannas, L. E. (1985), Flat-Panel Displays and CRTs, Van Nostrand Reinhold, New York.