

SR-332에 의한 전자식 안정기의 신뢰성 모형

A Reliability Model of Electronic Ballasts using SR-332

전 태 보*
Jeon, Tae-Bo

Abstract

As the level of technology and the standard of living improve, product reliability plays an increasingly significant role. This study has been performed to build a reliability model of electronic ballasts for the low wattage fluorescent lamp. Telcordia SR-332, one of the most widely used reliability specifications, was selected for the model development. We briefly reviewed the basic concepts of the electronic ballast. We then developed a reliability model for the ballast using SR-332 concepts and the reliability has been examined. We further discussed the significance of the first-year failure effect on the mean life.

키워드 : 안정기, 신뢰도예측, Telcordia, SR-332, 초년도승수

Keywords : ballast, reliability prediction, Telcordia, SR-332, first-year multiplier

1. 서론

기술수준의 향상 및 웰빙 문화의 확산과 더불어 제품의 품질과 신뢰성의 요구가 근래 매우 강조되는 추세이다. 저출력 형광등은 일반 가정과 사무실에서 그 용도가 매우 넓게 사용되는 방전램프이다. 오랜 전통을 가진 형광등으로서 품질 및 성능상의 정착이 이루어졌다고 생각되나 특별히, 에너지 절감, 효율성 증대, 수명보장 등의 차원에서 한 단계 성숙된 기술의 정착이 요구되고 있다.

안정기(ballast)는 조명기기를 구성하는 핵심요소로서, 부품 개선 및 다양한 회로 설계상의 노력을 통하여 성능상의 큰 진전을 이루고 있다. 이에 반해, 신뢰성 측면의 연구 결과는 거의 발표되지 않고 있는 실정이다. 이의 이유는 여러 가지가 있겠으나, 수반되는 전기·전자 소자의 수가 매우 많고, 각 소자의 전기적 또는 수명 특성 규명이 어렵고, 소자들이 복잡적이며 종속적이고, 신뢰성 구조상의 복잡성 등으로 모형의 설정이 매우 어렵다는 점을 들 수 있다.

Biswas and Dhanuka (1992)는 형광등용 전자식 안정기를 대상으로 연구를 수행하였다. 도시내

사무실, 탄광지역의 공장, 중공업 지역의 공장, 중공업지역의 공단 등 4 지역을 택하여 각각 수십~1000여개의 안정기를 설치 후 일정기간 동안 고장난 안정기들을 회수하여 고장부위를 분석하고 및 요인들을 도출하였다. 이를 바탕으로 설계상의 개선을 행하려 노력하였다. Shujuan et al. (2004) 역시 자력식 전자식 안정기를 대상으로 연구하였으며, 특별히 직교배열(orthogonal array)에 의한 파라미터 분석(parametric analysis)을 통하여 최적인자 수준을 결정하는 방법으로 연구를 수행하였다. 이들은 역률(power factor), 고조파 함유율, 그리고 왜형률(wave crest coefficients) 등을 목적함수로 택하고 이들에 영향을 미치는 요인들로 역률 개선회로의 캐패시터(capacitor), 평활 캐패시터, 그리고 트랜스포머(transformer)를 선택하여 직교배열에 의한 실험 및 분석을 수행하였다. 전태보(2006)는 전기·전자 부품 신뢰성 규격의 근간이 되는 MIL-HDBK-217(1995)을 이용하여 안정기의 신뢰성 예측 모형을 수립하였다. 또한 전태보 등(2006)은 타력식(external oscillation) 안정기를 대상으로 여러 소자들 중 신뢰성 측면에서 핵심이 되는 인버터 및 공진회로상의 일부 소자들을 선택하고, 이들을 중심으로 시간에 따른 전기적 특성의 동적 변화를 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

* 강원대학교 산업공학과 교수, 공학박사

본 연구의 목적은 저출력(low wattage) 형광등용 전자식 안정기를 대상으로 신뢰성 모형을 수립하여 이론적인 기틀을 마련하고, 실무적인 적용에의 기초를 마련함에 있다. 이를 위하여 현재 전기, 전자 부품의 신뢰도에 세계적으로 가장 많이 이용되는 Telcordia의 SR-332 규격(2001)을 고려한다.

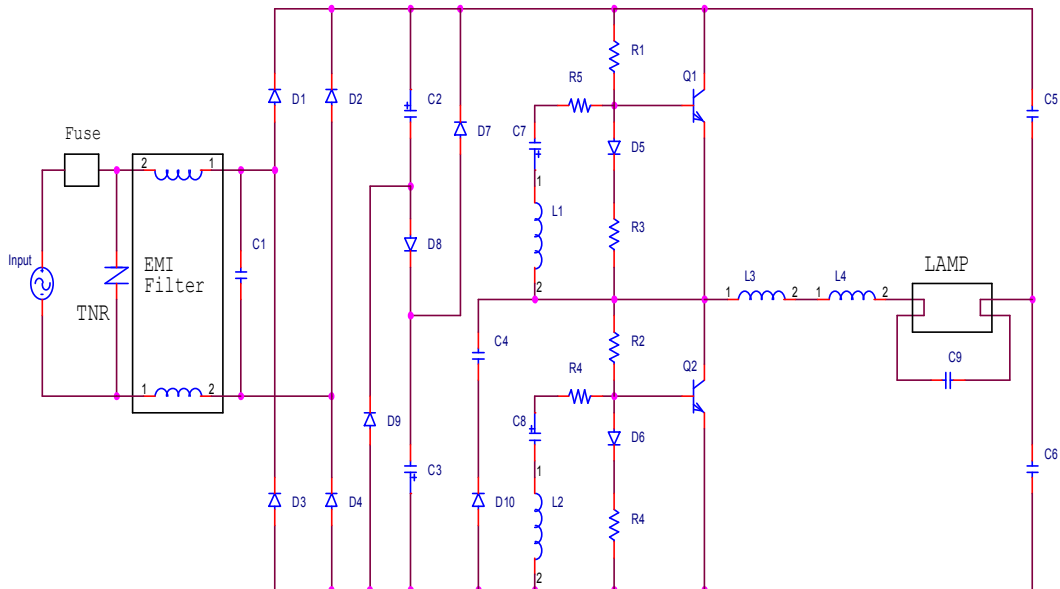
연구수행을 위하여 형광등용 전자식 안정기에 대한 개괄적인 내용을 고찰한다. 그리고는, 신뢰성의 예측 규격인 SR-332의 주요 내용 고찰과 전자식 안정기 회로를 구성하는 부품 및 회로에 대한 고장률(failure rate)을 도출한다. 이들을 기반으로, 전체 시스템에 대한 신뢰성 예측 모형을 수립하며 결과를 분석한다. 또한, 전기 전자부품의 경우 초기의 정착기간 동안 고장률이 높은 값으로부터 감소하는 특성이 있으므로 이를 반영할 경우의 신뢰성을 고찰한다.

2. 형광등 안정기

안정기는 크게 자기식 안정기(magnetic ballast)와 전자식 안정기(electronic ballast)로 분류된다. 자기식 안정기는 전류를 제한하는 안정기의 역할을 위해 L 즉, 철심에 동선을 권선한 철심 초크 또는 변압기 형태로 역률개선 또는 잡음방지 등을 위한 콘덴서와 같이 사용하여 램프를 적절하게 점화시키는데 사용되는 것을 말한다. 반면, 전자식 안정기는 코일 대신 반도체 부품과 수동전자 부품

으로 구성된 전자회로를 사용하여 교류 50Hz/60Hz의 전원을 주파수 변환회로를 이용하여 고주파(20kHz~100kHz)로 변환 후 램프전원으로 사용, 램프를 점화시킨다. 전자식 안정기는 자기식 안정기와 비교하여 발광효율이 향상되며, 반도체 소자를 사용하므로 초크 코일에서의 자체 발열로 인한 손실을 줄일 수 있어 자기식 안정기에 비해 큰 절전효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서 선정된 안정기 회로도 <그림 1>과 같다. 이 전자식 안정기에 의한 램프점화 동작 프로세스는 다음과 같다. 그림의 왼쪽 부분은 교류 전원(AC 60Hz)이 입력되는 부분으로 퓨즈(fuse)가 연결되어 있다. TNR은 전원라인의 과전압(surge voltage)이나 유도전파에 의한 급격한 펄스를 막는 부품이다. 다음은 라인필터(EMI filter) 회로 부분으로, 발생하는 전자파 장애(EMI: electromagnetic interference)를 억제하여 EMI 규정에 위배되지 않고 다른 전자기에 미치는 영향을 최소화한다. 노이즈(noise)가 제거된 교류전압(220V 60Hz)은 정류(rectify) 과정을 거쳐 직류전압으로 변환된다. 이 경우 역률 보상(PFC: power factor correction) 회로가 추가되며 이는 전원장치에 전력효율을 향상시키기 위하여 절전 회로를 추가한 것으로 순간적인 누출이 우려되는 전력을 조절하여 다른 부품들에게 안정적인 전류 공급을 하는 역할을 한다. PFC는 수동형과 능동형이 있으며, 수동형은 수동소자와 다이오드(diode)만 사용하



<그림 1> 전자식 안정기 회로도

고, 능동형은 스위칭을 이용한 승압형(boost type)의 IC (integrated circuit)를 이용한다. 일반적인 전자식 안정기의 경우 역률(power factor)이 95% 이상이다.

다음은, 공진 인버터(inverter)를 사용하여 DC를 다시 AC로 바꾼다. 인버터란 직류전압을 캐패시터(C)와 코일(L)을 가지고 전하가 충전과 방전을 되풀이하게 만들어 공진하게 해 교류전압으로 바꾸어주는 것을 말하며, 앞의 경우와 달리 이 인버터의 동작 주파수가 바로 램프에 인가되는 AC 전원의 주파수로 20-60KHz가 된다. 이때 동작주파수인 20KHz 이상의 주파수를 만들어 내는 방식에서 자려식 (self-oscillation)과 타려식(external oscillation)이 있다. 자려식은 트랜스포머(transformer)를 사용하는데 그림에서와 같이 3개의 권선을 하나의 코어에 감아서 (L1-L3) 1차측, 2차측, 3차측으로 만든다. 그리고는 램프로 흐르는 전류를 1차측에 흘리고 이로인해 2, 3차측에 인가되는 전압 및 그로 인해 흐르는 전류를 이용해서 스스로 20KHz 이상으로 스위칭한다.

3. Telcordia SR-332 개요

1984년 AT&T사의 분할과 함께, 지역별 벨 운영 회사들이 자체의 필요성으로 연구 기관인 Bellcore (Bell Communications Research, Inc.)를 설립하였다. 이후 1997년 SAIC(Science Applications International Corporation)이 매입함에 따라 1999년 Telcordia Technologies로 개명되었다. 2004년말 Telcordia는 다시 Warburg Pincus and Providence Equity Partners에게 판매되었으나, 회사명은 계속 Telcordia로 유지된다.

Bellcore는 초기 자신의 신뢰도 예측에 미 국방성의 신뢰성 예측 규격인 MIL-HDBK-217 (1991, 1995)을 사용했다. 그러나 회사 제품에 적용할 전문적인 자신의 신뢰성 규격 제정의 필요성으로 MIL-HDBK-217 모형을 수정 및 단순화함으로써 Bellcore 신뢰성 예측절차를 개발하였다. 이 후 1997년 Bellcore (TR-332) Issue 6 (1997)까지 여러 차례 수정·보완되었다. 2001년의 Telcordia document SR-332, Issue 1 (2001)은 TR-332, Issue 6의 수정·보완된 버전으로 공식 이름은 "Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment" (document number SR-332, Issue 1)이다. 많은 민수용 전기부품회사들은 Bellcore/Telcordia 규격서를 자신들의 신뢰성 예측에 적용한다.

SR-332의 접근 방식은 MIL-HDBK-217과 유사하나, 기본적으로 군수산업보다는 통신업체 및 상업용 시스템에 활용된다. SR-332의 신뢰성 분석 결과는 고장률이나 MTBF (mean time between

failures)의 형태로 제공되며, 고려되는 부품의 수명시간 분포는 지수분포(exponential distribution)를 가정한다. 고장률의 기본 단위는 10^9 (10억) 시간으로 정의된다.

SR-332에서는 전자 장비를 3개의 계층적 구성품으로 간주하고 있다. 이중, 부품(device)은 전기 전자 기본 구성품들을 말한다. 유니트(unit)는 부품들의 집합체로 보통 수리 불가능 한 형태로 사용자가 직접 교체할 수 있는 단위를 말한다. 그리고 시스템(system)은 유니트들의 집합체로 하나의 유니트 고장으로 시스템 고장의 유발이 가능한 것을 말한다. SR-332에서는 세 가지 레벨이 이루는 대상들을 기준으로 신뢰성을 예측하는 방법을 설명하고 있으며 공통적으로 다음의 팩터(factor)들을 신뢰성 예측에 고려한다.

① 품질(quality)

고장률 예측과정에 있어 SR-332에서는 부품 납품업체(supplier)에 대한 4가지 품질등급을 사용하고 있다. 각 품질등급에 대한 부품 제공자의 품질 개선 활동에 대해서는 독립적인 표로 제공되며, 기본고장률에 대한 곱셈 인자로 활용된다.

② 전기적 부하(electrical stress)

이는 해당 부품에 인가되는 전기적 부하(stress)가 수명에 미치는 영향을 함수형태로 정량화 한 것이다. 전기적 부하는 정격전압(전력)에 대한 인가전압(전력)의 백분율로, 이를 고장률에 대한 부하의 영향을 0.1-10.6까지의 정량 값으로 표현한다. 전기적 부하 팩터(II_S)는 다음 식을 통하여 구한다.

$$II_S = e^{m(p_1 - p_0)} \quad (1)$$

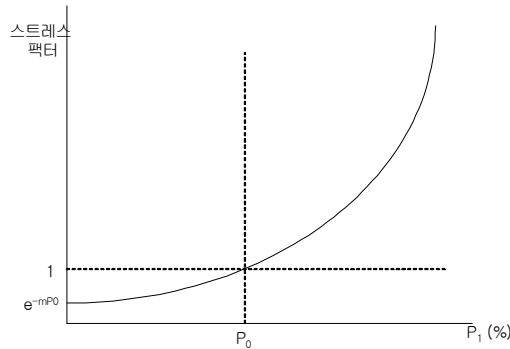
단, p_1 - 인가된 부하 퍼센트(%)

p_0 - 기준 부하(reference stress, 50%)

m - 모수 값

m의 값에 따라 곡선 형태가 달라지며 총 11가지로 분류한다. 이 팩터의 값은 공식을 사용하여 구하거나, 부품에 따라 부하 수준별로 제공된 도표 값으로 구한다. <그림 2>는 부하 팩터의 함수 모양을 도시한다. 인가 부하(p_1)가 기준치 p_0 (=50%) 보다 클수록 1 보다 큰 값을 가지며 증가한다.

경우에 따라 전류와 전압 등 2가지 요인에 의하여 전기적 부하가 정의되는 경우가 있다. 이러한 경우는 개별적으로 부하 팩터를 구한 뒤 이들의 곱으로 전체 부하 팩터 값을 산출한다.



<그림 2> 전기적 부하 팩터 함수

③ 동작온도 (operating temperature)

온도는 전기·전자부품의 신뢰도에 가장 큰 영향을 미치는 요인이다. 이 팩터의 값 역시 0.4-6.4 범위로 부품 및 온도별 표로 제공된다. 온도 조건에 따른 부품의 수명은 아레니우스(Arrhenius) 공식에 기반하며, 온도팩터는 다음 식으로 계산된다.

$$\Pi_T = e^{\frac{Ea}{k}(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1})} \quad (2)$$

- 단, T_0 - 기준온도(40℃+273),
- T_1 - 실제 동작온도(℃+273)
- Ea - 활성화 에너지(activation energy)
- k - 볼츠만 상수 = 8.62×10^{-5}

이의 함수형태 역시 <그림 2>와 비슷한 형태를 가지며 기준온도(T_0)는 40℃로 정의된다. 전기적 부하 팩터의 경우와 비슷하게 Ea의 값에 따른 10가지의 곡선형태를 가정한다.

④ 환경(environment)

실제로 제품이 사용될 때 노출될 수 있는 환경조건에 따라 수명이 달라질 수 있으며, SR-332에서는 이러한 환경조건을 “Ground Fixed Controlled, Ground Fixed Uncontrolled, Ground Mobile, Airborne Commercial, Space-based Commercial” 등 5가지로 분류하며, 1-15까지의 다양한 환경팩터 값으로 적용한다.

이상의 팩터들은 모두 부품의 안정상태 고장률(steady-state failure rate)에 영향을 주는 것이다. 안정상태란 부품의 신뢰도가 정착되어 시간에 따라 변동이 없는 상태를 의미하며, 욕조곡선(bath-tub curve) 상의 임의고장률(random failure rate) 기간에 해당된다. 고장률, 욕조곡선, 그리고 수명분포에 대한 개념은 Keceioglu(1991a,b)를 참

조할 수 있다. 이제, 특정 부품 i의 고장률은 일반 안정상태 고장률(generic steady-state failure rate)에 상술한 팩터 값들을 곱한 형태로 정의된다. 즉,

$$\lambda_{SS} = \lambda_G \Pi_Q \Pi_S \Pi_T \quad (3)$$

- 단, λ_G - 부품 i의 일반 안정상태 고장률
- $\Pi_Q \Pi_S \Pi_T$ - 부품 i의 품질, 부하, 온도 팩터 값

일반 안정상태 고장률(λ_G)은 부품별로 다르게 정의되며 각 부품 및 특성별로 도표 값으로 제공된다. 최종 고장률 단위는 FIT(failure per billion device hours)로 10억 시간당 고장횟수를 의미한다.

유니트 및 시스템의 고장률 계산은 원칙적으로 구성 부품들 및 이들의 구조형태에 따라 달라진다. SR-332에서는 직렬구조(series structure)를 가정하며 유니트의 경우 안정상태 고장률은 유니트를 이루고 있는 모든 부품들의 고장률 합과 유니트에 적용되는 환경팩터의 곱으로 계산한다

$$\lambda_{Unit} = \Pi_E \times \sum_{i=1}^n N_i \cdot \lambda_{SS} \quad (4)$$

- 단, n - 유니트내 구성 부품들의 종류(수)
- N_i - 부품 종류 i의 수량
- Π_E - 유니트에 적용되는 환경팩터 값

고려하는 시스템이 고장원리, 장비구성 그리고 작동조건 등에서 직렬구조라고 판단하는 것이 적절하다면, 시스템의 총 고장률(λ_{System})은 모든 유니트의 안정상태 고장률을 합산한 것이 될 것이다. 즉,

$$\lambda_{System} = \sum_{j=1}^k \lambda_{Unit(j)} \quad (5)$$

- 단, $\lambda_{Unit(j)}$ - 유니트 j의 안정상태 고장률
- k - 유니트의 종류 수

4. 안정기 소자별 고장률 산출

본 연구의 사용환경은 기본적으로 어느 정도 쾌적하고 안정된 경우를 가정한다. 그러나 부성저항(negative resistance) 특성으로 인해 접화가 불안정해지거나 그 자체로 램프가 파손될 수 있다. 즉, 램프 접화시 순간적인 필라멘트의 예열과정과 접화시의 매우 높은 부하가 수반되며 이후 정상상태로 지속되다 소등시 다시 높은 전기적인 부하가 수반된다. 또한 램프는 명시적으로 고려하지 않으며, 이 경우 고정된 저항으로 간주할 수 있다. 그러나 램프는 독립적으로 신뢰성을 연구해야 할 정

도로 전기적 특성 규명과정의 복잡하여 단순한 저항으로 취급함에는 문제가 있다. 대신 이에 대한 다른 부품에의 영향을 고려함이 필요하다. 램프의 변동성이 부품들에 미치는 영향은 안정기 후반부로 갈수록 심해진다.

SR-332에서는 부품 보다는 유니트에 환경팩터를 적용하고 유니트 내의 부품들이 동일한 팩터 값을 갖도록 정의되나 여기서는 램프의 변동으로 인한 영향이 부품에 다르게 미치므로 부품별로 환경 영향이 다름을 가정하며 1-6사이에서 적절한 값들을 가정한다. 다음으로, 부품들의 품질수준은 제조과정 및 품질상의 시스템화가 다소 열악한 중소기업을 가정하여 품질수준을 0 (품질팩터 값은 6)으로 적용한다. 마지막으로, 부품 또는 시스템의 테스트나 필드 데이터는 없다고 가정한다.

이제 각 구성 소자 및 회로별로 신뢰도를 계산한다. 참고로, TNR은 규격에 고려되어 있지 않으며, 고장이 없음을 가정한다.

4.1 퓨즈(fuse)

단일 부품인 퓨즈의 범주는 miscellaneous이고 세부범주가 fuse이다. 이의 타입은 30A 이하이다. 퓨즈의 고장률은 온도에 영향을 받지 않으며, 다음과 같이 얻어진다. 퓨즈의 환경팩터는 1로 가정한다.

$$\lambda_{SS_{Fuse}} = 0.5 \times 6 \times 1 \times 1 = 3.0 \quad (6)$$

4.2 EMI filter 회로

EMI filter 회로는 60Hz 교류전기의 노이즈(noise)를 제거하는 부분이다. 이 회로는 2개의 코일(coil)과 1개의 캐패시터(capacitor) 등 두 종류의 부품으로 구성되어 있다.

SR-332에 있어 코일의 범주(category)는 inductor (inductive device)이며 타입(type)은 power filter이다. 부품의 기본고장률은 SR-332(2001)의 Table 7-1 Device Failure Rate (Sheet 15 of 16)로부터 $\lambda_G = 19$ 이고 온도곡선 형태는 3으로 이는 식 (2)에서 $E_a = 0.15$ 임을 의미한다. 동작온도 40°C를 가정할 경우 도표로부터 $\Pi_T = 1.0$ 임을 알 수 있다. 이 부품에 있어서의 전기적 부하는 정의되지 않으며 따라서 $\Pi_S = 1$ 을 적용한다. 종합적으로, $\Pi = 1$ 을 가정하며 코일의 고장률은 식 (3)에 의거

$$\lambda_{SS_{코일}} = 2 \times 19 \times 6 \times 1.0 \times 1.0 = 228.0$$

으로 주어진다.

다음은 캐패시터(capacitor) C1이다. 이는 세부 범주가 고정형(fixed)의 Paper/Plastic이다. SR-332 분류상 이 부품은 기본고장률 10, 온도 곡선 2, 그리고 전기부하 곡선 J로 정의된다. 온도곡선 2에 있어서 동작온도 40°C의 경우 $\Pi_T = 1.0$ 임을 알 수 있다. 그리고 부하 곡선 J의 경우 $m = 0.059$ 이며 부하는 전압이 주 대상이며 약 80%의 부하를 정의할 때 도표로부터 $\Pi_S = 5.87$ 로 구해진다. 참고로, 부하 공식을 적용할 경우는 다음과 같이 계산된다.

$$\Pi_S = e^{0.059(80-50)} = 5.87$$

따라서, 캐패시터(C1)의 안정상태고장률은 다음과 같이 구해진다. 역시 환경팩터는 1로 가정한다.

$$\lambda_{SS_{C1}} = 10 \times 6 \times 5.87 \times 1.0 \times 1 = 352.2$$

EMI filter 회로의 고장률은, 두 부품 코일과 캐패시터의 직렬결합으로 이루어지므로, 각 고장률의 합인 식 (7)로 주어진다.

$$\lambda_{EMI Filter} = 228 + 352.2 = 580.2 \quad (7)$$

4.3 정류(rectifying) 회로

정류회로는 노이즈가 여과된 전류를 직류로 전환하는 부분이다. 이 회로는 동일한 4개의 다이오드(diode: D1-D4)로 구성된다. 다이오드의 타입은 silicon, general purpose이며 1.5W 이상인 hermetic 패키지에 해당한다. SR-332 분류 기준에 의거 기본고장률은 $\lambda_G = 6$ 이고 온도곡선 4, 전기부하 곡선 FK에 해당한다. 부하 곡선이 FK라 함은 다이오드가 전류 및 전압 등 2가지 부하에 의해 영향을 받으며 각각 곡선 F와 K의 복합으로 정의됨을 말한다. 이중 전류부분은 정격전류 1A와 인가전류 0.25A로부터 $0.25/1 = 25\%$ 이며, 전압부분은 700V와 110V로부터 $110/700 = 16\%$ 이다. 따라서 전류, 전압 팩터는 각각 0.4842과 0.8155으로 주어지며, Π_S 는 이들의 곱인 0.3949로 계산된다. 마지막으로, 동작온도가 50°C일 경우 $\Pi_T = 1.29$ 이다. 환경팩터는 2로 가정한다. 따라서, 정류회로의 안정상태 고장률은 식 (8)과 같다.

$$\lambda_{Rectify} = 4 \times 6 \times 6 \times 0.3949 \times 1.29 \times 2 = 146.71 \quad (8)$$

4.4 역률개선회로

역률개선(PFC) 회로는 3개의 다이오드(D7, D8, D9)와 2개의 전해 캐패시터(C2, C3)로 구성되어 있다. 이중 다이오드의 규격은 앞의 정류회로 부분과

동일하되 전기적 부하에 있어서 전류부분 25%(=0.25/1), 전압부분 31.4%(220/700)의 부하를 적용하며 $\Pi_S=0.4332$ 가 얻어진다. C2와 C3는 전해 캐패시터로 용량은 $10\mu F$ 으로 Fixed, Aluminum (Chassis Mounted) $<400\mu F$ 의 hermetic 패키지에 해당한다. 따라서, $\lambda_G=40$ 이고 온도곡선 7, 전기 부하 곡선 E에 해당한다. 즉, 동작온도 $55^\circ C$, 전기적 부하 31.4%를 가정시 $\Pi_T=1.97, \Pi_S=0.64$ 이다. 환경팩터는 역시 1 가정한다. 역률개선 회로의 안정상태 고장률은 식 (9)와 같이 구해진다.

$$\lambda_{PFC} = (3 \times 6 \times 6 \times 0.4332 \times 1.29 \times 2) + (2 \times 40 \times 6 \times 0.64 \times 1.97 \times 1) = 725.89 \quad (9)$$

4.5 인버터(inverter) 회로

이후의 회로는 스타터(starter), 드라이버(driver), 인버터(inverter), 그리고 공진회로 등으로 구성되나 편의상 인버터로 통합하여 고려한다. 인버터회로는 직류전기를 다시 20-60kHz 고주파의 교류전기로 복원하는 부분이다. 이 부분은 가장 복잡하며 캐패시터 6개(C4-C9), 다이오드 3개(D5-D6, D10), 저항(resistor) 6개(R1-R6), 트랜지스터 2개(Q1,Q2), 코일 1개 (L4), 그리고 transformer 1개(L1-L3) 등으로 구성된다. 인버터 회로 부품들 각각에 대한 세부 고찰 및 고장률 계산 과정은 앞에서 고려하지 않은 부품들을 대상으로

로 간단히 고찰하며, 종합적인 분류 및 계산 결과를 <표 1>과 같이 도시한다.

저항(R1-R6)은 범주가 고정형(fixed)이고 세부 분류가 1메가 옴(ohm)이하의 Film (carbon oxide)형이며, 동작전력은 약 0.1W이다. 이의 환경팩터는 6을 가정하였고 동작온도 $50^\circ C$, 전기적 부하는 40%(=0.1/0.25)로 정의하였다. 코일(L4)은 inductive device (coil)중 power filter로 분류된다. 이의 기본고장률은 19이고 온도곡선은 3으로 동작온도 $80^\circ C$ 를 가정시 온도팩터는 1.8776이다. 전기 부하는 정의되지 않으며 1로 설정된다. 트랜스포머(L1-L3)는 코일과 같이 범주가 inductive device이며 세부 범주가 트랜스포머이다. 이의 동작온도는 $60^\circ C$ 를 가정하였다. 트랜지스터(Q1,Q2)는 세부 범주가 실리콘(silicon)으로 6W 이상의 NPN형이다. 이 소자는 다른 부품들에 비하여 전기적 부하 및 동작온도가 매우 높으며, 궁극적으로 안정기의 고장이 가장 많이 유발되는 부품이다. 트랜지스터의 전기적 부하는 전력과 전압의 복합형태로 정의되며 모두 곡선 E의 형태를 가진다. 이들 각각에 있어 46%(=32/70)와 55%(=220/400)의 인가 부하가 예상되며 부하 팩터 값은 1.0243이다. 동작온도 역시 높은 $85^\circ C$ 를 가정하며 $m=0.22$ 인 곡선 4로 정의된다. 기타 세부적인 내용은 표에 정의되었다.

Inverter 회로의 안정상태 고장률은 이들의 합으로 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda_{Inverter} = 7049.47 \quad (10)$$

<표 1> Inverter 회로 부품별 고장률

설계 번호	범주	세부범주 및 타입	Π_E	수량	λ_G	p_1 (%)	Π_S	온도 ($^\circ C$)	Π_T	고장률
C4	Capacitor	Fixed, Paper/Plastic	2	1	10	35	0.4127	40	1.00	49.52
D10	Diode	Silicon, General Purpose	2	1	6		0.8155	40	1.00	58.72
C7,C8	Capacitor	Aluminum(Chassis Mounted) $<400\mu f$	2	2	40	20	0.4868	50	1.5825	739.55
D5,D6	Diode	Silicon, General Purpose	2	2	6		0.8155	40	1.00	117.43
R1-R6	Resistor	Fixed, Film(Carbon Oxide) <1 메가옴	6	6	0.5	40	0.8788	50	1.188	112.75
L1-L3	Inductor Transformer	Pulse High Level	6	1	19	-	-	60	1.3964	955.14
C5,C6	Capacitor	Fixed, Paper/Plastic	6	2	10	17.5	0.1470	70	1.3829	146.37
Q1,Q2	Transistor	Silicon, NPN	10	2	10		1.0243	85	2.7869	3425.55
L4	Inductor Coil	Power Filter	6	1	19	-	-	80	1.8776	1284.28
C9	Capacitor	Fixed, Paper/Plastic	6	1	10	32.5	0.3561	60	1.2493	160.16

5. 안정기 신뢰성

안정기에 있어 소자들의 구조가 복잡하나 기능적 측면에서 임의의 한 소자가 고장시 전체가 고장나는 직렬구조 특성을 지닌다. 이들이 각각 독립임을 가정하여 최종적인 안정기회로에 대한 안정상태 고장률은 식(6)-(10)의 합으로 식 (11)과 같이 예측된다.

$$\lambda_{Balast} = 8505.27 (FIT/10^9hrs) \quad (11)$$

SR-332에서 고장률은 10^9 시간 단위를 기준하므로, 안정기 수명이 지수분포를 따른다는 가정하에 확률밀도함수는

$$f(t) = \frac{8505.27}{1000000000} e^{-\frac{8505.27}{1000000000}t}, \quad t \geq 0$$

로 표현된다. 수명의 기대치는 $\frac{1}{\lambda}$ 이므로

$$MTTF = \frac{1000000000}{8505.27 * 8760} \approx 13.42(\text{years})$$

으로 예측된다. 또한 시간에 따른 신뢰도, $R(t)$, 는 다음과 같다.

$$R(t) = e^{-\frac{8505.27}{1000000000}t}, \quad t \geq 0$$

<표 2>는 유도된 고장률을 바탕으로, 수명에 대한 확률밀도함수 $f(t)$ 와 동작 시간에 따른 안정기 신뢰도 $R(t)$ 를 도시한 것이다. $h(t)$ 는 고장률함수(hazard function)로 지수분포의 경우 일정한 값을 갖는다. 결과로부터 20,000시간 (2.28년) 후 고장 확률이 16% 정도에 이르며 60,000시간 (6.85년) 후에는 신뢰도가 60% 정도 기대됨을 알 수 있다.

앞에서 계산한 고장률을 통하여 개별 부품이나 회로에 대한 신뢰성도 예측 가능하다. 특별히, 스위칭용 트랜지스터 (Q1,Q2) 등이 다른 부품들에 비하여 고장률이 매우 높다. 다음으로 공진회로의 코일(L4), 트랜스포머(L1-L3), 그리고 역률개선회로상의 캐패시터 부분 등이 신뢰성 차원에서 우려되는 부분이다. 반면, 일부 부품들의 고장률은 매우 낮아 안정기의 신뢰성 예측에 크게 열려하지 않아도 된다는 결론이다. 퓨즈, EMI filter 회로 부품들인 코일 및 캐패시터(C1), PFC회로상의 다이오드, inverter 회로의 캐패시터 (C4,C5,C6) 등이 이에 해당된다. 특별히, 캐패시터 C5, C6의 부하는 매우 큰 편이나 필름컨덴서의 우수한 특성으로 고장률은 높지 않다는 결론이다.

이 외에도 시간에 따른 안정기 신뢰도의 변화, 특정 신뢰도를 유지하기까지의 임무시간(mission time), 그리고 잔존수명 등을 포함한 다양한 분석 및 예측 등이 가능하다.

<표 2> 동작 시간별 주요 신뢰도 결과

t	f(t)	F(t)	R(t)	h(t)
0	0.00000851	0.0000	1.0000	0.00000851
20000	0.00000717	0.1564	0.8436	0.00000851
40000	0.00000605	0.2884	0.7116	0.00000851
60000	0.00000511	0.3997	0.6003	0.00000851
80000	0.00000431	0.4936	0.5064	0.00000851
100000	0.00000363	0.5728	0.4272	0.00000851
120000	0.00000307	0.6396	0.3604	0.00000851
140000	0.00000259	0.6960	0.3040	0.00000851
160000	0.00000218	0.7436	0.2564	0.00000851
180000	0.00000184	0.7837	0.2163	0.00000851
200000	0.00000155	0.8175	0.1825	0.00000851
220000	0.00000131	0.8461	0.1539	0.00000851
240000	0.00000110	0.8701	0.1299	0.00000851
260000	0.00000093	0.8904	0.1096	0.00000851
280000	0.00000079	0.9076	0.0924	0.00000851
300000	0.00000066	0.9220	0.0780	0.00000851

6. 초년도승수를 고려한 신뢰도

SR-332에서는 전기·전자 부품의 다양한 데이터 분석을 통하여 초기 1년간 고장률이 점차 감소하되 시간에 따라 안정상태 고장률에 대한 비(ratio)로 표현되는 초년도승수를 정의하였으며, <표 3>은 이를 도시한다. 예를들어, 시간구간 [150, 200]의 고장률은 기간 [7000, ∞)의 상수고장률에 비하여 2.8배 임을 의미한다.

초년도승수를 고려할 경우 안정상태만을 고려할 경우와 신뢰도가 어떻게 다른지 검토하자. 이를 위하여 전자는 시간 구간별 안정상태고장률($\lambda = 8505.27/1000000000$)에 초년도승수 값을 곱하여 적용하고, 후자는 λ 값을 전 구간에 걸쳐 적용하였다. <표 4>가 이들에 대한 세부 내용을 도시한다. 초년도승수를 고려할 경우 평균수명은 13.01년으로 결과되었다. 이는 앞의 13.42년과 0.41년 차이가 나며, 전자를 기준으로 약 3.15%의 오차에 해당한다. 이는 1년간의 초기 고장률감소 기간을 무시해도 큰 문제가 없음을 반영한다. 이는 도출된 고장률이 매우 작기 때문이며, 고장률이 클 경우는 양자간에 차이가 커진다. <그림 3><그림 4>가 두 경우의 확률밀도함수와 신뢰도함수를 도시한다. 이 그림에서 초기기간 외에는 서로 근접함을 알 수 있다. 참고로, 표에서 시점 7000 이후 안정기에 접어들며 고장률이 변함이 없음을 주지하자.

<표 3> SR-332 초년도 승수

시간구간 (hr)	초년도 승수	시간구간 (hr)	초년도 승수
[0, 2]	4.0	[500, 600]	2.3
[2, 3]	3.9	[600, 800]	2.2
[3, 5]	3.8	[800, 1000]	2.1
[5, 10]	3.7	[1000, 1200]	2.0
[10, 15]	3.6	[1200, 1400]	1.9
[15, 25]	3.5	[1400, 1600]	1.8
[25, 35]	3.4	[1600, 2000]	1.7
[35, 50]	3.3	[2000, 2500]	1.6
[50, 70]	3.2	[2500, 3000]	1.5
[70, 100]	3.1	[3000, 3500]	1.4
[100, 150]	3.0	[3500, 4000]	1.3
[150, 200]	2.8	[4000, 5000]	1.2
[200, 250]	2.7	[5000, 6000]	1.2
[250, 350]	2.6	[6000, 7000]	1.1
[350, 400]	2.5	[7000, inf)	1.0
[400, 500]	2.4	-	-

실제 전기·전자 부품들의 경우 예상되는 평균 수명이 본 연구에서처럼 길지 못하며, 이보다 훨씬 작게 예상된다. 이러한 경우 초년도승수나 마모로 인한 고장률 증가로 인한 영향이 매우 클 것이다. 본 연구의 결과는 설계상의 수명으로 소비자들의 전기적 부하가 안정적임을 가정한 환경하에서 도출한 것으로 신뢰도 예측치로서 수용 가능하며 좋은 목표치 역할을 한다.

7. 결론

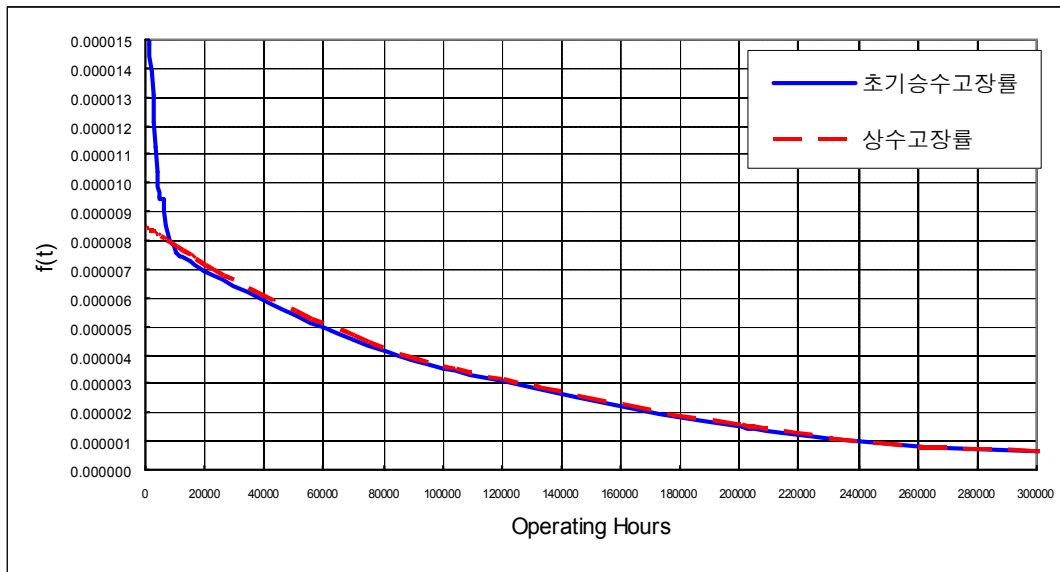
본 연구에서는 저출력 형광등용 전자식 안정기 가운데 자려식에 대한 신뢰성 예측 모형을 Telcordia의 SR-332를 이용하여 수립하였다. 특별히, SR-332는 MIL-HDBK-217과 함께 전기전자 부품의 신뢰성 예측에 폭 넓게 이용되는 대표적인 모형으로서 이를 통한 예측 또한 기업에 있어서는 제품 품질상의 중요한 기반을 제공한다. 본 연구에서는 설계상의 신뢰도를 도출하였으며, 부품들에

<표 4> 초년도승수 고장률과 상수 고장률 경우의 신뢰도

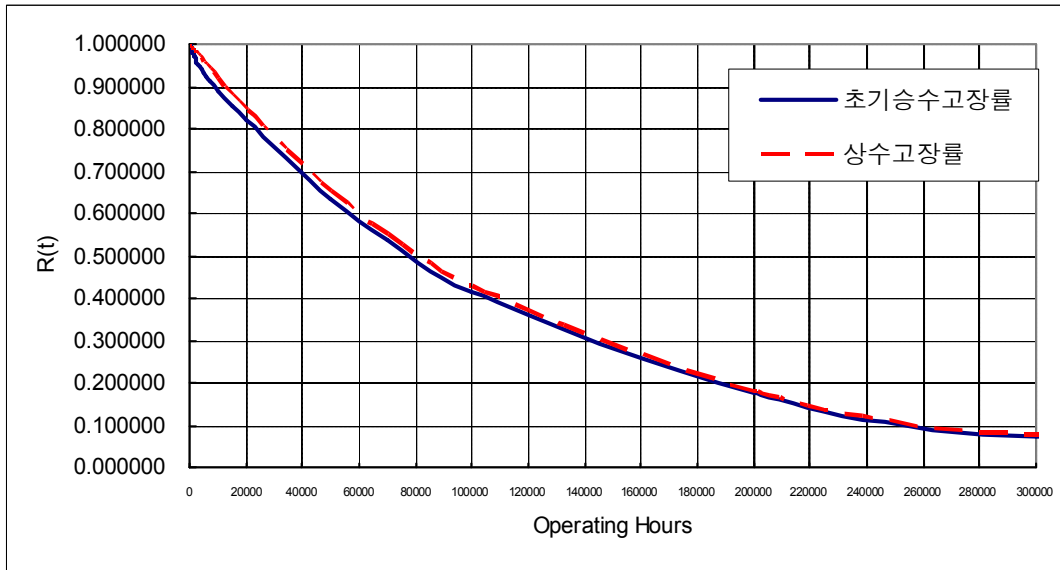
t	초년도 승수	고장률	f(t)		R(t)	
			초년도승수 고장률	상수고장률	초년도승수 고장률	상수 고장률
0	4	0.0000340211	0.0000340211	0.0000085053	1.000000	1.000000
2	4.0	0.0000340211	0.0000340188	0.0000085051	0.999932	0.999983
3	3.9	0.0000331706	0.0000331672	0.0000085051	0.999899	0.999974
5	3.8	0.0000323200	0.0000323147	0.0000085049	0.999834	0.999957
10	3.7	0.0000314695	0.0000314593	0.0000085045	0.999677	0.999915
15	3.6	0.0000306190	0.0000306044	0.0000085042	0.999524	0.999872
25	3.5	0.0000297684	0.0000297454	0.0000085035	0.999226	0.999787
35	3.4	0.0000289179	0.0000288872	0.0000085027	0.998937	0.999702
50	3.3	0.0000280674	0.0000280258	0.0000085017	0.998517	0.999575
70	3.2	0.0000272169	0.0000271617	0.0000085002	0.997974	0.999405
100	3.1	0.0000263663	0.0000262921	0.0000084980	0.997184	0.999150
150	3.0	0.0000255158	0.0000254115	0.0000084944	0.995913	0.998725
200	2.8	0.0000238148	0.0000236892	0.0000084908	0.994728	0.998300
250	2.7	0.0000229642	0.0000228169	0.0000084872	0.993586	0.997876
350	2.6	0.0000221137	0.0000219233	0.0000084800	0.991392	0.997028
400	2.5	0.0000212632	0.0000210577	0.0000084764	0.990338	0.996604
500	2.4	0.0000204126	0.0000201742	0.0000084692	0.988319	0.995756
600	2.3	0.0000195621	0.0000192958	0.0000084620	0.986387	0.994910
800	2.2	0.0000187116	0.0000183879	0.0000084476	0.982703	0.993219
1000	2.1	0.0000178611	0.0000174895	0.0000084332	0.979199	0.991531
1200	2.0	0.0000170105	0.0000166001	0.0000084189	0.975873	0.989846
1400	1.9	0.0000161600	0.0000157192	0.0000084046	0.972724	0.988163
1600	1.8	0.0000153095	0.0000148464	0.0000083903	0.969750	0.986484
2000	1.7	0.0000144590	0.0000139407	0.0000083618	0.964158	0.983133
2500	1.6	0.0000136084	0.0000130317	0.0000083263	0.957620	0.978961
3000	1.5	0.0000127579	0.0000121395	0.0000082910	0.951531	0.974807

<표 4> - 계속

t	초년도 승수	고장률	f(t)		R(t)	
			초년도승수 고장률	상수고장률	초년도승수 고장률	상수 고장률
3500	1.4	0.0000119074	0.0000112630	0.0000082558	0.945882	0.970670
4000	1.3	0.0000110569	0.0000104008	0.0000082208	0.940667	0.966551
5000	1.2	0.0000102063	0.0000095033	0.0000081512	0.931115	0.958365
6000	1.2	0.0000102063	0.0000094068	0.0000080821	0.921661	0.950249
7000	1.1	0.0000093558	0.0000085426	0.0000080137	0.913078	0.942201
10000	1.0	0.0000085053	0.0000075703	0.0000078118	0.890075	0.918464
15000	1.0	0.0000085053	0.0000072551	0.0000074865	0.853017	0.880224
20000	1.0	0.0000085053	0.0000069531	0.0000071748	0.817501	0.843576
50000	1.0	0.0000085053	0.0000053872	0.0000055590	0.633395	0.653598
70000	1.0	0.0000085053	0.0000045445	0.0000046895	0.534317	0.551359
100000	1.0	0.0000085053	0.0000035211	0.0000036334	0.413986	0.427190
200000	1.0	0.0000085053	0.0000015042	0.0000015521	0.176850	0.182491
300000	1.0	0.0000085053	0.0000006426	0.0000006631	0.075549	0.077958



<그림 3> 초기고장률 경우와 상수고장률 경우의 확률밀도함수



<그림 4> 초기고장률 경우와 상수고장률 경우의 신뢰도함수

대한 실제적인 제조환경, 품질, 정격, 온도에 대한 실측치, 그리고 여러 시험데이터 등의 확립으로 실제 값에 가까운 신뢰도가 예측될 수 있을 것이다. 본 연구에서의 결과는 전자식 안정기 뿐 아니라 미래의 제품과 다른 전기전자 제품에의 과급에도 좋은 기반으로서의 역할을 한다.

참 고 문 헌

- [1] 전태보, MIL-HDBK-217을 이용한 형광등용 전자식 안정기의 신뢰성 모형, 2006 한국품질경영학회. 추계학술대회, 부산 백스코, pp. 327-332, 2006년 11월 17일.
- [2] 전태보, 장목순, 박종연, 형광등용 전자식 안정기의 신뢰성 평가를 위한 접근, 2006 한국품질경영학회. 추계학술대회, 부산 백스코, pp. 333-338, 2006년 11월 17일.
- [3] Biswas, S. K. and Dhanuka, R. P., Reliability of Electronic Ballasts in Industrial Fluorescent Lighting Applications, *Industry Applications Society Annual Meeting*, 1992, Conference Record of the 1992 IEEE, 4-9, Oct., , vol. 2, pp. 1915-1919.
- [4] Keceioglu, D., *Reliability Engineering Handbook Volumn 1*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- [5] Keceioglu, D., *Reliability Engineering Handbook Volumn 2*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1991.
- [6] MIL-HDBK-217F, *Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment*, Department of Defense, 1991.
- [7] MIL-HDBK-217F Notice 2, *Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment*, Department of Defense, 1995.
- [8] Shujuan, W., Hui, Z., and Hongliang, G., Research on Parameter Optimization Design Method of Electronic Ballast Based on Orthogonal Design, *The 30th Annual Conference on the IEEE Industrial Electronics Society*, November 2-6, 2004, Busan, Korea.
- [9] *Technical Reference, TR-332, Issue 6, Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment*, Bellcore, 1997.
- [10] *Telcordia Special Report, Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment* (document number SR-332, Issue 1), Telcordia Technologies, 2001.