

# 형광등용 전자식 안정기의 신뢰성 모형

전태보<sup>\*†</sup>

\* 강원대학교 산업공학과

## A Reliability Model of Electronic Ballasts for Fluorescent Lamp

Tae Bo Jeon<sup>\*†</sup>

\* Department of Industrial Engineering, Kangwon National University

Key Words : Ballast, Reliability Prediction, MIL-HDBK-217

### Abstract

A study to build a reliability model of electronic ballasts for the fluorescent lamp has been performed in this study. We selected the widely being used specification, MIL-HDBK-217 for the study. We briefly reviewed the basic concepts of the electronic ballast with the selected reliability specification. We then developed a reliability model for the ballast using MIL-HDBK-217 and predicted the reliability. We further provided some guides which should be considered in future model development.

### 1. 서 론

제품의 품질과 신뢰성의 중요성이 매우 강조되고 있으며 우리 생활 속에 오랜 동안 함께하는 형광 램프의 경우 에너지 절감, 효율성 증대, 수명보장 등의 차원에서 한 단계 성숙된 기술의 정착이 요구되고 있다. 핵심 구성품인 안정기(ballast)의 경우 회로설계 및 소자 개선 등 많은 노력을 통하여 기술 및 품질상의 진전을 이루었으나, 중소기업 전용 업종으로서 다소 열악한 환경 및 전문 기술인의 부족, 기타 문제의 복잡성으로 개선의 여지가 많다.

특히, 신뢰성 분야의 연구 결과는 매우 미미한 편으로 제한적인 결과만 발표되었다. Biswas and Dhanuka (1992)는 36W 형광등용 자력식(self-oscillating) 안정기를 대상으로 신뢰성 제고를 위한 연구를 수행하였다. 그들은 도시내 사무실, 탄광지역의 공장, 중공업 지역의 공장, 중공업지역의 공단 등 4 지역을 택하여 각각 수십~1000여개의 안정기를 설치 후 일정기

간의 고장난 안정기들을 회수하여 분석하고 고장부위 및 요인들을 도출하였다. 이를 바탕으로 설계상의 개선을 수행하는 방법으로 연구를 진행하였다. Shujuan et al.(2004) 역시 자력식 전자식 안정기를 대상으로 연구하였으며, 파라미터 분석(parametric analysis)을 통하여 최적 인자 수준을 결정하는 방법으로 연구를 수행하였다. 이들은 역률(power factor), 고조파 함유율, 그리고 전류의 왜형률(wave crest coefficients)을 목적함수로 택하고 이에 영향을 미치는 요인들로 역률개선회로의 캐패시터(capacitor), 평활 캐패시터, 그리고 트랜스포머(transformer)를 선택하여  $L_9(3^4)$  배열에 의한 실험 및 분석을 수행하였다.

신뢰성 규격을 통한 예측이 가능하며 전기전자 부품 관련 세계적인 신뢰성 규격에는 미 국방성의 MIL-HDBK-217, Telcordia 회사의 규격인 SR-332, 미국 신뢰성분석센터의 Prism, MIL-HDBK-217, 영국의 HRD, 프랑스의 CNET, 일본의 NTT 등이 고려될 수 있다. 이들 중 대표적인 규격은 미 국방성의 MIL-HDBK-217과 Telcordia 회사의 규격이 있으나, 안정기 신뢰성과 관련하여 시도된 규격은 없다. 특별히, 전태보(2006)는 Telcordia의 SR-332(2001) 규격을 이용하여 포괄적인 안정기 시스템 신뢰성 예측 모형을 수립하

† 교신저자 tbjeon@kangwon.ac.kr

※ 본 연구 수행에 있어 안정기의 전기적 특성에 대해 많은 도움을 주신 강원대학교 전기전자공학부 박종연 교수께 감사드립니다.

고, 수명 및 시간에 따른 신뢰도를 구하였다. SR-332는 민수용 전자통신 부품 및 제품의 신뢰성 수립에 있어서 세계적으로 가장 많이 이용되는 규격이다. 전태보 등(2006)은 타러식(external oscillation) 안정기를 대상으로 여러 소자들 중 신뢰성 측면에서 핵심이 되는 인버터 및 공진회로상의 일부 소자들을 선택하고, 이들을 중심으로 시간에 따른 전기적 특성의 동적변화를 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

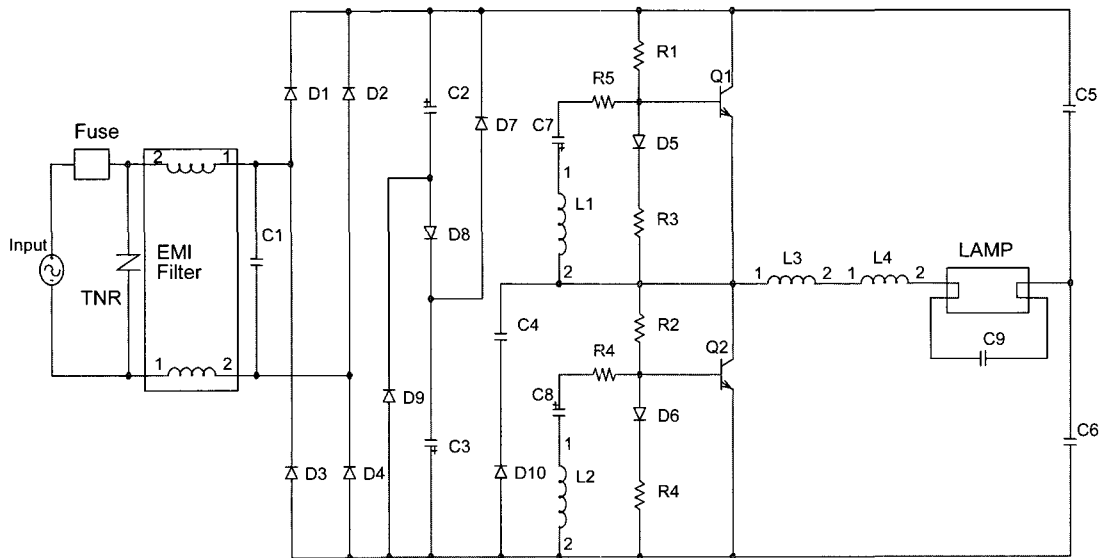
본 연구에서는 MIL-HDBK-217(1991, 1993, 1995)을 이용하여 저출력(low wattage) 안정기 신뢰성 예측 모형을 수립하고자 한다. 본 연구수행을 위하여 제2장에서 형광등용 전자식 안정기에 대한 내용을 간단히 고찰한다. 제3장에서는 신뢰성의 예측 모형인 MIL-HDBK-217의 주요 내용을 고찰하며, 제4장과 제5장에서는 전자식 안정기 회로를 구성하는 부품 및 유니트/부시스템에 대한 고장률과 전체 시스템에 대한 신뢰성 예측 모형을 수립한다. 그리고 제6장에서는 이상의 내용을 바탕으로 보다 현실적인 신뢰도 예측을 위하여 고려하여야 할 사항들을 도출하였다. 마지막으로, 연구의 결론과 향후의 방향에 대한 제언을 한다.

## 2. 형광등 안정기 및 신뢰성

본 연구에서는 전자식 안정기(electronic ballast)를 고려하며 <그림 1>이 선정된 회로도들을 도시한다.

그림의 왼쪽 부분은 교류 전원(AC 60Hz)이 입력되는 부분으로 퓨즈(fuse)와 TNR(transient non-linear resistance)이 연결되어 있다. TNR은 전원라인의 서지(surge) 전압 제거를 위해 이용된다. EMI(electromagnetic interference) filter 회로는 발생하는 전자파장해를 억제하여 다른 전자기기에 미치는 영향을 최소화한다. 정류(rectify) 회로는 교류전압을 직류전압으로 변환된다. 역률개선(PFC : power factor correction) 회로는 시스템의 입력 전원의 용량성 잡음과 고조파를 감소시켜 시스템 입력 전력의 효율을 향상시킨다. 인버터(inverter)는 DC를 다시 AC로 바꾼다. 즉, 전압을 캐패시터(C)와 코일(L)을 가지고 전하가 충전과 방전을 되풀이하게 만들어 공진하게 해 교류전압으로 바꾸어주는 것을 말하며, 앞의 경우와 달리 인버터의 동작 주파수가 바로 램프에 인가되는 AC전원의 주파수로 20~60KHz가 된다. 본 연구에서는 트랜스포머(transformer)를 사용하는 자력식(self-oscillation)을 고려하며, 3개의 권선을 하나의 코어에 감아서 1차측, 2차측, 3차측(그림의 L1-L3)으로 만든다. 그리고는 램프로 흐르는 전류를 1차측에 흘리고 이로 인해 2, 3차측에 인가되는 전압 및 그로 인해 흐르는 전류를 이용해서 20KHz 이상으로 스위칭한다.

신뢰성 있는 안정기 차원에서 처음 설계를 및 개발 단계부터 신뢰성 제고를 위한 체계적인 접근이 필요할 것이다. 첫 단계로 고려되는 내용은 신뢰성 척도의



<그림 1> 전자식 안정기회로

정의이며 대표적으로 안정기의 수명, 역률, 보호회로 기능 등이 고려된다. 이들의 목표치로는 절대적이지는 않지만 10초간의 스위치 on과 50초간의 스위치 off 테스트 15,000회, 역률 0.95이상, 회로의 오결선 및 전기의 과부하시 보호회로 동작 여부 등이다. 다음 단계는 안정기 고장의 정의이며 이에 램프가 정상적인 경우의 안정기 미동작, 램프의 밝기(조도) 30% 이하, 그리고 입력 전원 이상이 없을 시의 역률 저하(예 : 0.95) 등이다. 이후 고장 모드와 이에 따른 영향 분석과 신뢰성 블록 다이어그램을 통한 신뢰성 고찰이 수행되며, 이들은 수행된 설계 회로와 선정 부품들의 전기적 특성에 따라 좌우된다. 최종 설계된 시스템을 중심으로 부품들의 고장률 및 시스템의 신뢰성을 예측한다. 이의 결과에 따라 보안을 위해 이전의 단계로 되돌아가거나 다음의 제품 생산단계로 간다. 본 연구에서는 설계를 완료한 단계에서의 부품 고장률과 시스템 신뢰도를 예측하는 부분이 직접 관련된다.

### 3. MIL-HDBK-217 개요

MIL-HDBK-217은 미 국방성의 전자통신관련 군수산업 제품을 대상으로 제정된 신뢰성 규격이다. 처음 제안된 이래 여러 차례 개정을 거듭하였으며 현재 존재하는 것은 1995년의 version F, notice 2인 MIL-HDBK-217FN2이다. 1995년 이후 추가적인 노력이 이루어지지 않는 관계로 이후의 버전은 존재하지 않지만 세계적으로 전기전자 부품이나 제품 신뢰성의 중심적인 역할을 해오고 있다.

MIL-HDBK-217에서의 신뢰성 지표는 고장률(failure rate)이나 MTBF(mean time between failures)의 형태로 제공되며, 고려되는 부품의 수명은 지수분포(exponential distribution)를 가정한다. 즉, 임의 고장률(random failure rate)을 가정하며, 고장률은  $10^6$ (백만) 시간을 단위로 정의된다. 참고로, SR-332의 경우  $10^9$ (10억) 시간을 기본 단위로 사용한다.

MIL-HDBK-217에서는 각 부품들의 고장률 산정에 있어 기본 고장률(basic failure rate)을 정의하고 이에 추가로 제조여건, 사용환경, 그리고 사용중 부품에 인가되는 전기적부하, 동작 온도, 및 기타 여건 등을 보정 팩터(factor)들로 고려한다. 따라서, 특정 부품의 고장률은 기본 고장률에 상술한 팩터 값들을 곱한 형태로 정의된다. 예를들어, 다이오드(diode)의 경우 고장률( $\lambda_p$ )은 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda_p = \lambda_b \Pi_T \Pi_S \Pi_Q \Pi_E$$

이 식에서  $\lambda_b$ 는 다이오드의 기본 고장률로 부품범주, 종류(type), 그리고 전기적 특성(전류, 전압, 전력 등)에 따라 다른 값으로 제공된다.  $\Pi_T, \Pi_S, \Pi_Q, \Pi_E$ 는 각각 동작상의 온도, 동작시 부품에 인가되는 전기적부하(electric stress), 제조상의 품질수준, 그리고 사용환경 등의 팩터를 의미한다. 이들 값 역시 적용여건에 따라 도표나 공식으로 제공된다. 전체적으로, 고장률 공식과 적용되는 팩터들은 부품별로 다르며 동일 부품에 대해서도 범주 및 타입별로 팩터의 적용 값들이 다르다. 참고로, 온도팩터( $\Pi_T$ )는 주위온도 25℃를 기준으로 부품에 인가되는 동작온도에 따라 차이하며 아레니우스 공식에 의거한 다음 식으로 산출한다.

$$\Pi_T = e^{-\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T+273} - \frac{1}{298} \right)}$$

단,  $k$  : 볼츠만 상수,  $8.617 \times 10^{-5}$

$E_a$  : 소자 및 소자의 타입별로 다른 값을 가짐

최종적으로, 전체 시스템의 고장률은 부품별 고장률을 계산한 뒤 개별 부품들이 서로 독립임을 가정하여 이들의 합으로 정의한다.

### 4. MIL-HDBK-217에 의한 고장률

안정기의 동작환경은 가정, 사무실, 공장 등 다양하며 그에 따라 결과 또한 매우 다르게 예측된다. 본 연구의 사용환경은 기본적으로 어느 정도 쾌적하고 안정된 경우를 가정한다. 그러나 형광등은 방전램프로서 방전에 필요한 열전자를 방출하기 위하여 초기에 높은 전압이 필요하며, 방전 후 램프전류가 커지면 형광등에 인가된 전압은 반대로 감소하는 부정저항(negative resistance) 특성을 갖고 있다. 이 부정저항 특성으로 인해 점화가 불안정해지거나 그 자체로 램프가 파손될 수 있다. 즉, 램프 점화시 순간적인 필라멘트의 예열과정과 점화시의 매우 높은 부하가 수반되며 이후 정상상태로 지속되다 소등시 다시 높은 전기적인 부하가 수반된다.

본 연구에서 램프는 명시적으로 고려하지 않으며, 이 경우 고정된 저항으로 간주할 수 있다. 그러나, 램프는 독립적으로 신뢰성을 연구해야 할 정도로 전기적 특성 규명과정이 복잡하여 단순한 저항으로 취급

함에는 문제가 있다. 대신 이에 대한 다른 부품에의 영향을 고려함이 필요하다. 램프의 변동성이 부품들에 미치는 영향은 안정기 후반부로 갈수록 심해진다. 동시에 조용한 사무실의 경우에도 일반 생활상의 진동(vibration)이 불규칙하게 작용하며 이의 영향이 안정기의 수명에 큰 영향을 미치는 것으로 인식되는 추세이다. 이러한 측면에서 램프를 포함한 요인들이 각 부품에 다르게 영향을 미치므로, 총 14가지로 정의되는 환경팩터( $\Pi_E$ ) 값을 중심으로 적절히 다르게 가정한다. 또한, 품질팩터( $\Pi_Q$ )는 부품들의 제조과정과 품질관리를 위한 시스템화와 관련을 가진다. 일반적으로, MIL-HDBK-217은 군용부품으로 납품되는 제품 및 품질을 기반으로 정의되었고 이에 따라 매우 높은 품질 수준을 요구한다. 국내의 경우 제조과정 및 품질상의 시스템화가 다소 열악한 중소기업을 가정하여 품질수준을 commercial이나 lower를 적용한다.

이제 각 구성 회로별로 신뢰도를 계산한다. 단, MIL-HDBK-217에서 TNR을 포함하지 않으므로 고려 대상에서 제외한다.

#### 4.1 Fuse

MIL-HDBK-217에서 퓨즈의 교체회수와 실제 퓨즈의 고장회수 간에는 관련이 없다는 고려이다. 이러한 측면에서 MIL-HDBK-217F 이후 변경이 없으며 고장률 공식은 다음과 같다.

$$\lambda_p = \lambda_b \Pi_E$$

단,  $\lambda_b$  : 기본고장률(basic failure rate)

$\Pi_E$  : 환경팩터(environment factor)

퓨즈의 기본고장률( $\lambda_b$ )은 모든 경우  $10^6$  시간 당 0.010회로 주어진다. 환경팩터는 규격상의 14가지 분류 중  $G_F$ 를 가정한 2로 정의하였다. 따라서, 퓨즈의 고장률은

$$\lambda_{Fuse} = 0.010 \times 2.0 = 0.02 \quad (1)$$

로 주어진다.

#### 4.2 EMI filter 회로

EMI 필터회로는 60KHz 교류전기의 노이즈를 제거하는 부분이다. 이 회로는 2개의 코일(coil)과 1개

의 캐패시터(capacitor) 등 2 부품으로 구성되어 있다.

##### 4.2.1 코일(coil)

코일의 고장률은 다음 식으로 주어진다. 즉,

$$\lambda_p = \lambda_b \Pi_T \Pi_Q \Pi_E$$

단,  $\Pi_T$  : 온도팩터

$\Pi_Q$  : 품질팩터

코일의 범주(category)는 inductive device이며 세부 범주(sub-category)는 코일이다. 타입(type)은 fixed inductor or choke이며 기본 고장률은 0.000030으로 주어진다.

코일의 동작온도는  $40^\circ\text{C}$ 로 가정되며  $\Pi_T=1.2$ 이다. 품질수준은 Lower를 가정한  $\Pi_Q=3.0$ , 환경팩터는  $G_F$ 를 가정하며  $\Pi_E=6$ 으로 정의된다. 따라서, 코일 2개에 대한 고장률은

$$\begin{aligned} \lambda_p &= 2 \times 0.000030 \times 1.2 \times 3.0 \times 6.0 \\ &= 0.001296 \end{aligned}$$

으로 주어진다.

##### 4.2.2 캐패시터(capacitor : C1)

캐패시터의 고장률은 전체적으로 다음 공식으로 정의된다.

$$\lambda_p = \lambda_b \Pi_T \Pi_C \Pi_V \Pi_{SR} \Pi_Q \Pi_E$$

단,  $\Pi_C$  : 용량팩터(capacitance factor) 용량(C)에 따라,  $\Pi_C = C^{0.09}$  또는  $\Pi_C = C^{0.23}$ 로 정의된다.

$\Pi_V$  : 전압 스트레스 팩터(voltage stress factor) 동작전압 대 정격전압의 비(S)의 함수로 정의된다.

$\Pi_{SR}$  : 직렬저항 팩터(series resistance factor) 이는 여러 타입중 탄탈 CSR 타입에만 적용되며 기타는 모두 1 값으로 정의된다.

캐패시터는 본 연구의 안정기와 관련하여 크게 알루미늄 전해 캐패시터와 필름 캐패시터로 분류된다. 이 부품은 필름 캐패시터에 해당되며 세부분류가 CHR(Fixed, Metalized Paper, Paper Plastic Film or Plastic Film Dielectric)으로 용량(C)이  $0.1\mu\text{F}$ 이다. 이를 기준으로 각 팩터 값들은 다음과 같다. 즉,

$\lambda_b = 0.00051$  (CHR)  
 $\Pi_T = 1.3$  (40℃)  
 $\Pi_C = 0.8128$  (용량  $C = 0.1\mu F$ 이며,  
 $\Pi_C = C^{0.09}$ 이다.)  
 $\Pi_V = 5.214$  ( $S = \frac{220}{275} = 0.8$ 이며,  
 $\Pi_V = (\frac{0.8}{0.6})^5 + 1$ 이다.)  
 $\Pi_{SR} = 1$  (CHR 경우는 1)  
 $\Pi_Q = 10$  (Commercial/unknown  
screening level)  
 $\Pi_E = 20$  ( $G_M$ 을 가정)

$$\lambda_p = 0.00051 \times 1.3 \times 0.8128 \times 5.214 \times 1.0 \times 10 \times 20 = 0.56195$$

이제 EMI 필터 회로의 고장률은 이들의 합으로 식 (2)와 같다.

$$\lambda_{EMI} = 0.001296 + 0.56195 = 0.56325 \quad (2)$$

### 4.3 정류(rectifying) 회로(D1~D4)

정류회로는 노이즈가 여과된 전류를 직류로 전환하는 부분으로 이 부분은 4개의 동일한 다이오드(diode)로 구성된다. 다이오드의 고장률 공식은 다음과 같다.

$$\lambda_p = \lambda_b \Pi_T \Pi_S \Pi_C \Pi_Q \Pi_E$$

단,  $\Pi_S$  : 전기적부하 팩터(electric stress factor)  
 $\Pi_C$  : 접촉부 처리 팩터(contact construction factor)

$\Pi_S$ 는 전압 스트레스를 반영하는 인가전압 대 정격전압 비 ( $\frac{V_{operated}}{V_{rated}}$ )의 함수로 이 값이 클수록 큰 스트레스를 갖는다.  $\Pi_C$ 는 접촉부위가 야금적(metallurgically) 또는 비야금적(non-metallurgically) 처리에 따라 각각 1과 2 값을 갖도록 정의된다.

정류회로 다이오드들의 범주는 LOW FREQUENCY 이고, 타입은 “fast recovery power rectifier”이며 기본고장률, 팩터 값들, 그리고 최종 고장률은 다음과 같다.

$\lambda_b = 0.025$  (fast recovery power  
rectifier)  
 $\Pi_T = 2.2$  (동작온도 50℃)  
 $\Pi_S = 0.054$  ( $\frac{V_{operated}}{V_{rated}} = \frac{110}{700} \leq 0.3$ 에 해당)  
 $\Pi_C = 1.0$  (Metallurgically bonded)  
 $\Pi_Q = 5.5$  (Lower를 가정)  
 $\Pi_E = 9$  ( $G_M$ 을 가정)  
 $\lambda_p = 4개 \times 0.025 \times 2.2 \times 0.054 \times 1.0 \times 5.5 \times 9 = 0.58806$

즉, 정류회로의 고장률은 식 (3)과 같다.

$$\lambda_{Rectify} = 0.58806 \quad (3)$$

### 4.4 역률개선(power factor correction) 회로

역률개선회로는 2개의 캐패시터(C2, C3)와 3개의 다이오드(D7, D8, D9)로 구성된다.

#### 4.4.1 캐패시터(C2,C3)

PFC 회로의 캐패시터는 알루미늄 전해컨덴서로 discrete 및 고정형(fixed)이며 타입이 CE(fixed electrolytic)로 분류된다. 이의 용량은  $10\mu F$ 이며 350V의 전압 정격을 갖는다. 이의 고장률 산출 과정은 다음과 같다.

$\lambda_b = 0.00012$  (CE)  
 $\Pi_T = 3.5$  (55℃)  
 $\Pi_C = 1.70$  ( $C = 10\mu F$ ,  $\Pi_C = 10^{0.23}$ )  
 $\Pi_V = 1.039$  ( $S = 110/350$ )  
 $\Pi_{SR} = 1$  (CE의 경우 1)  
 $\Pi_Q = 10.0$  (commercial을 가정)  
 $\Pi_E = 20$  ( $G_M$ 을 가정)

$$\lambda_p = \lambda_b \Pi_T \Pi_C \Pi_V \Pi_{SR} \Pi_Q \Pi_E = 2개 \times 0.00012 \times 3.5 \times 1.7 \times 1.039 \times 1.0 \times 10.0 \times 20 = 0.2967384$$

#### 4.4.2 다이오드(D7, D8, D9)

PFC 회로 다이오드의 범주는 LOW FREQUENCY 이고 타입은 정류회로에서와는 달리 “general pur-

pose"이다. 이들의 고장률은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \lambda_b &= 0.0038 && (\text{general purpose}) \\ \Pi_T &= 2.2 && (50^\circ\text{C}) \\ \Pi_S &= 0.06 && (\text{voltage regulator}) \\ & && V_s = \frac{220}{700} > 0.3, \Pi_S = V_s^{2.43} = 0.06 \\ \Pi_C &= 1.0 && (\text{Metallurgically bonded}) \\ \Pi_Q &= 5.5 && (\text{lower 가정}) \\ \Pi_E &= 9 && (G_M \text{를 가정}) \\ \lambda_p &= \lambda_b \Pi_T \Pi_S \Pi_C \Pi_Q \Pi_E \\ &= 3\text{개} \times 0.0038 \times 2.2 \times 0.06 \times 1.0 \times 5.5 \times 9 \\ &= 0.0745 \end{aligned}$$

즉, 역률보상회로의 고장률은 식 (4)와 같다.

$$\lambda_{PFC} = 0.371 \quad (4)$$

## 4.5 Inverter 회로

이후의 회로는 전원작동(power on)때 스위치를 위해 펄스(pulse)를 발생시키는 starter 회로, 스위치 on/off를 위한 교대신호를 발생시키는 driver 회로, 직류전기를 다시 40KHz의 교류전기로 복원하는 부분인 인버터 및 공진회로 등으로 구성된다. 편의상 이들을 모두 인버터회로의 범주에 포함시켜 논한다.

### 4.5.1 캐패시터(C4)

C4는 필름컨덴서로 EMI filter의 C1과 동일한 discrete 및 고정형(fixed)으로 타입이 CHR이다. 이의 용량은  $10\mu F$ 이며 고장률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_b &= 0.00051 && (\text{CHR}) \\ \Pi_T &= 1.3 && (40^\circ\text{C}) \\ \Pi_C &= 0.5765 && (C = 0.0022\mu F, \Pi_C = 0.0022^{0.09}) \\ \Pi_V &= 1.0668 && (S=220/630 = 0.3492) \\ \Pi_{SR} &= 1 && (\text{CHR 경우 1}) \\ \Pi_Q &= 10 && (\text{Commercial 가정}) \\ \Pi_E &= 20 && (G_M \text{을 가정}) \\ \lambda_p &= \lambda_b \Pi_T \Pi_C \Pi_V \Pi_{SR} \Pi_Q \Pi_E \\ &= 0.00051 \times 1.3 \times 0.5765 \times 1.0668 \times 1.0 \\ &\quad \times 10 \times 20 \\ &= 0.08155 \end{aligned}$$

### 4.5.2 다이오드(D10)

다이오드 소자 D10은 PFC의 D7-D9 경우와 동일하게 low frequency이고, 타입은 "general purpose"이다. 이들의 고장률은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \lambda_b &= 0.0038 && (\text{general purpose}) \\ \Pi_T &= 1.6 && (40^\circ\text{C}) \\ \Pi_S &= 0.054 && (V_s = \frac{110}{700} \leq 0.3) \\ \Pi_C &= 1.0 && (\text{Metallurgically bonded}) \\ \Pi_Q &= 5.5 && (\text{Lower 가정}) \\ \Pi_E &= 9 && (G_M \text{를 가정}) \\ \lambda_p &= \lambda_b \Pi_T \Pi_S \Pi_C \Pi_Q \Pi_E \\ &= 0.0038 \times 1.6 \times 0.054 \times 1.0 \times 5.5 \times 9 \\ &= 0.01625 \end{aligned}$$

### 4.5.3 캐패시터(C7, C8)

알루미늄 전해컨덴서로 C2, C3의 경우와 동일한 타입인 CE(fixed electrolytic)으로 용량은  $1\mu F$ 이고 정격전압이 50V이다. 고장률은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \lambda_b &= 0.00012 && (\text{CE}) \\ \Pi_T &= 2.9 && (50^\circ\text{C}) \\ \Pi_C &= 1 && (C = 1\mu F) \\ \Pi_V &= 1.0 && (S = 10/50) \\ \Pi_{SR} &= 1 && (\text{CE 타입의 경우 1}) \\ \Pi_Q &= 10.0 && (\text{Commercial 가정}) \\ \Pi_E &= 20 && (G_M \text{을 가정}) \\ \lambda_p &= \lambda_b \Pi_T \Pi_C \Pi_V \Pi_{SR} \Pi_Q \Pi_E \\ &= 2\text{개} \times 0.00012 \times 2.9 \times 1.0 \times 1.0 \times 1 \times 10 \times 20 \\ &= 0.1392 \end{aligned}$$

### 4.5.4 다이오드(D5, D6)

역시 동일한 low frequency용이며 타입은 general purpose이다.

$$\begin{aligned} \lambda_b &= 0.0038 && (\text{general purpose}) \\ \Pi_T &= 1.6 && (40^\circ\text{C}) \\ \Pi_S &= 0.054 && (V_s = \frac{110V}{700V} \leq 0.3) \\ \Pi_C &= 1.0 && (\text{Metallurgically bonded}) \\ \Pi_Q &= 5.5 && (\text{lower 가정}) \\ \Pi_E &= 9 && (G_M \text{을 가정}) \end{aligned}$$

$$\lambda_p = \lambda_b \Pi_T \Pi_S \Pi_C \Pi_Q \Pi_E$$

$$= 2\text{개} \times 0.0038 \times 1.6 \times 0.054 \times 1.0 \times 5.5 \times 9$$

$$= 0.0325$$

**4.5.5 저항(resistor : R1~R6)**

Driver 회로에서의 저항 타입은 RL(fixed, film, insulated)이며, 전력 정격 1/4W, 동작전력 0.05~0.1W로 정의된다. 저항의 고장률 공식은 MIL-HDBK-217F까지는 범주별 공식이 달랐으나 FN2에서 다음과 같이 한가지로 통일되었다.

$$\lambda_p = \lambda_b \Pi_T \Pi_P \Pi_S \Pi_Q \Pi_E$$

단,  $\Pi_P$  : 전력팩터(power factor)로 소비전력(power dissipation)에 따라 다른 값을 가짐. 즉,  
 $\Pi_P = (\text{소비전력})^{0.39}$

- $\lambda_b = 0.0037$  (Fixed, film, insulated)
- $\Pi_T = 1.3$  (50°C)
- $\Pi_P = 0.4074$  (소비전력 = 0.1W,  $\Pi_P = 0.1^{0.39}$ )
- $\Pi_S = 1.1024$  (S = 0.1/0.25 = 0.4,  
 $\Pi_S = 0.71e^{1.15S}$ )
- $\Pi_Q = 10.0$  (Commercial/unknown)
- $\Pi_E = 16$  ( $G_M$ 을 가정)

$$\lambda_p = 6\text{개} \times 0.0037 \times 1.3 \times 0.4074 \times 1.1024$$

$$\times 10 \times 16 = 2.07385$$

**4.5.6 트랜스포머(transformer : L1, L2, L3)**

1차, 2차, 3차 코일로 구성되는 트랜스포머의 경우 범주는 inductive device이며, 세부범주는 transformer이다. 타입은 low power pulse(peak power < 300W, average. power < 5W)이고, 고장률 공식은 코일의 경우와 동일하다. 즉,

$$\lambda_p = \lambda_b \Pi_T \Pi_Q \Pi_E$$

- $\lambda_b = 0.022$  (low power pulse)
- $\Pi_T = 1.6$  (60°C)
- $\Pi_Q = 3.0$  (Lower를 가정)
- $\Pi_E = 12$  ( $G_M$ 을 가정)

$$\lambda_p = 0.022 \times 1.6 \times 3 \times 12 = 1.2672$$

**4.5.7 캐패시터(C5, C6)**

필름 컨덴서로 EMI filter 회로의 C1, starter 회로

의 C4와 동일하게 CHR(fixed metalized)로 분류된다. 용량은 0.1 $\mu$ F이며 정격전압은 630V이다.

- $\lambda_b = 0.00051$
- $\Pi_T = 2.2$  (70°C)
- $\Pi_C = 0.8128$  (C = 0.1 $\mu$ F,  $\Pi_C = 0.5^{0.09}$ )
- $\Pi_V = 1.002$  (S = 110/630)
- $\Pi_{SR} = 1$  (CHR의 경우 1)
- $\Pi_Q = 10.0$  (Commercial를 가정)
- $\Pi_E = 40$  ( $A_{RW}$ 를 가정)

$$\lambda_p = \lambda_b \Pi_T \Pi_C \Pi_V \Pi_{SR} \Pi_Q \Pi_E$$

$$= 2\text{개} \times 0.00051 \times 2.2 \times 0.8128 \times 1.002$$

$$\times 1 \times 10 \times 40$$

$$= 0.7310$$

**4.5.8 트랜지스터(Q1, Q2)**

반도체 중 트랜지스터는 범주 low frequency, Bipolar로 분류되고, 타입은 NPN 또는 PNP(frequency < 200MHz)이다. 트랜지스터의 고장률 공식은 다음과 같다.

$$\lambda_p = \lambda_b \Pi_T \Pi_A \Pi_R \Pi_S \Pi_Q \Pi_E$$

단,  $\Pi_R$  : power rating factor

$$\Pi_R = 0.43, \quad P_{rated} \leq 0.1$$

$$P_r^{0.43}, \quad P_{rated} > 0.1$$

- $\lambda_b = 0.00074$  (NPN and PNP)
- $\Pi_T = 3.3$  (85°C)
- $\Pi_A = 0.70$  (switching용)
- $\Pi_R = 9.1783$  ( $P_{rated} = 400W$ ,  $\Pi_R = 400^{0.37}$ )
- $\Pi_S = 0.29$  ( $V_s = 220/400 = 0.55$ ,  
 $\Pi_S = 0.045e^{3.1 \times V_s}$ )
- $\Pi_Q = 5.5$  (Lower를 가정)
- $\Pi_E = 32$  ( $M_L$ 를 가정)

$$\lambda_p = 2\text{개} \times 0.0074 \times 3.3 \times 0.7 \times 9.1783 \times 0.29$$

$$\times 5.5 \times 32$$

$$= 1.6016$$

**4.5.9 코일(L4)**

EMI filter 회로의 코일과 동일하며, 범주는 inductive device, coil이다. 이의 타입은 fixed inductor or choke이다.

$\lambda_b = 0.000030$  (Fixed inductor or choke)  
 $\Pi_T = 1.9$  (80°C)  
 $\Pi_Q = 3.0$  (Lower를 가정)  
 $\Pi_E = 12$  ( $G_M$ 을 가정)

$\lambda_p = \lambda_b \Pi_T \Pi_Q \Pi_E$   
 $= 0.000030 \times 1.9 \times 3.0 \times 12 = 0.002052$

4.5.10 캐패시터(C9)

필름 컨덴서로 타입은 CHR이다. 이 소자의 경우 기본 규격은 C4와 동일하나 순간부하가 무척 큰 것이 특징이다.

$\lambda_b = 0.00051$  (CHR)  
 $\Pi_T = 1.8$  (60°C)  
 $\Pi_C = 0.54$  (0.001μF)  
 $\Pi_V = 1.0466$  (S = 130/400)  
 $\Pi_{SR} = 1.0$  (CHR 경우 1)  
 $\Pi_Q = 10.0$  (Commercial를 가정)  
 $\Pi_E = 40$  ( $A_{RW}$ 를 가정)

$\lambda_p = 0.00051 \times 1.8 \times 0.54 \times 1.0466 \times 1.0 \times 10 \times 40$   
 $= 0.2075$

인버터 회로의 고장률은 이들의 합으로 다음과 같다.

$\lambda_{inverter} = 6.1527$  (5)

5. 안정기의 신뢰성

최종적인 안정기회로 전체에 대한 안정상태 고장률은 식 (1)~식 (5)의 합으로 식 (6)과 같이 예측된다.

$\lambda_{Balust} = 7.695$  (회/10<sup>6</sup>hrs) (6)

안정기 수명이 지수분포를 따른다는 가정하의 확률밀도함수는

$f(t) = \frac{7.695}{1000000} e^{-\frac{7.695}{1000000}t}, t \geq 0$

로 표현되며, 수명의 기대치는 다음과 같이 예측된다.

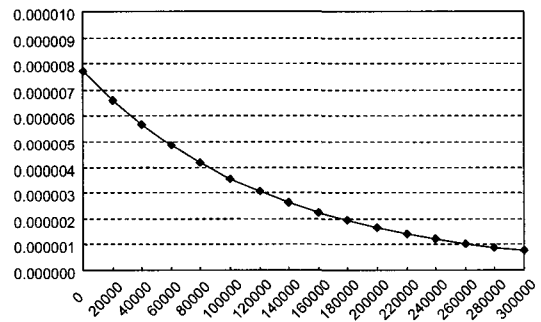
$MTTF = \frac{1000000}{7.695 \times 8760} = 14.83(\text{years})$

또한, 시간에 따른 신뢰도,  $R(t)$ 는 다음과 같다.

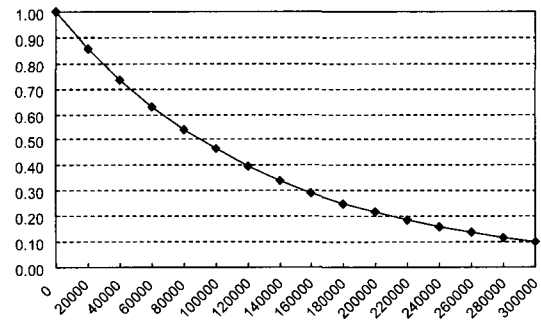
$R(t) = e^{-\frac{7.695}{1000000}t}, t \geq 0$

<표 1> 시간에 따른 안정기 신뢰도 결과

t	f(t)	R(t)	h(t)
0	0.00000770	1.000000	0.00000770
20000	0.00000660	0.857358	0.00000770
40000	0.00000566	0.735062	0.00000770
60000	0.00000485	0.630211	0.00000770
80000	0.00000416	0.540317	0.00000770
100000	0.00000356	0.463245	0.00000770
120000	0.00000306	0.397166	0.00000770
140000	0.00000262	0.340514	0.00000770
160000	0.00000225	0.291942	0.00000770
180000	0.00000193	0.250299	0.00000770
200000	0.00000165	0.214596	0.00000770
220000	0.00000142	0.183985	0.00000770
240000	0.00000121	0.157741	0.00000770
260000	0.00000104	0.135241	0.00000770
280000	0.00000089	0.115950	0.00000770
300000	0.00000076	0.099410	0.00000770



<그림 2> 안정기 수명의 확률밀도함수



<그림 3> 시간에 따른 신뢰도

<표 1>과 <그림 2>, <그림 3>은 시간에 따른 확률밀도함수와 신뢰도함수를 도시한 내용이다. 전체적으로 고장률이 작기 때문에 신뢰도가 급격하게 감소



하지 않음을 알 수 있다. 표의 마지막 열은 고장률함수,  $h(t)$ 를 나타낸다.

이상과 같이 각 부품 및 회로별로 계산한 고장률을 통하여 개별 부품이나 회로에 대한 신뢰성도 예측 가능하다. 이 외에도 특정 신뢰도에 대한 임무시간, 잔여수명 등 다양한 분석 및 예측 등이 가능하다.

## 6. 모형 설정상의 고려 사항

이상의 결과를 통하여 예측된 안정기의 수명 14.83년은 실제 안정기의 수명보다 높은 편이다. 이는 설계상의 수명으로 실제 부품들을 대상으로 하지 않은 데서 기인한다. 더욱이 램프를 명시적으로 고려하지 않은 것 외에 부품들의 품질이나 전기적 특성들이 안정된 환경하에서 운영됨을 가정한 경우의 결과이다. 그럼에도 불구하고 실제 안정기의 특성과 신뢰도를 적절히 반영한 결과로 인식된다.

현실적인 측면에서 지적되며 향후 추가적인 연구 및 방향의 설정에 고려될 사항들은 다음과 같이 요약된다.

### 6.1 MIL-HDBK-217에서의 기본적인 가정은 지수분포이다.

지수분포는 수명 특성에 대한 가장 기초적이고 사용이 간편하며 실무에서 많이 활용된다. 그러나, 맹목적인 지수분포의 현실 문제예외의 적용에는 비판이 수반된다(Murphy, 2002). 필드 데이터에 의하면 본 연구에서 고려하지 않은 램프의 수명특성은 지수분포보다는 정규분포에 가깝다. 이렇게 단위 부품이 지수분포가 아닐 때 전체 시스템의 수명 특성 분포에 대한 재검토가 요구 될 것이다.

### 6.2 각 소자들의 수명 특성이 서로 종속적이다.

소자들의 전기적 특성, 특히 동작시간에 따라 또는 전류 상승에 의한 열의 발생으로 캐패시터의 용량이 감소되며, 스위칭 소자의 전력손실을 초래하는 등 소자들이 독립이 아닌 종속적인 특성을 소유한다. 따라서, 한 소자의 전기적 특성으로 인한 다른 소자의 특성변화를 고려하여 분석함이 필요하다. 이는 매우 어려운 문제이나 Shujuan et al.(2004) 또는 전태보 등(2006)의 접근이 이의 부분적인 해결책을 제공한다.

### 6.3 Critical component가 존재한다.

안정기의 신뢰성을 위하여 모든 부품의 개별특성을 고려함도 가능하나, 실제로 전체 수명을 좌우하는 일부 부품들이 있을 수 있다. 우리의 결과는 트랜지스터나 트랜스포머 등 일부 부품이 전체 안정기 수명을 좌우할 수 있음을 반영한다. 따라서, 일부 부품에 대한 집중적인 분석을 통한 전체 신뢰성 고찰도 가능하다.

### 6.4 초기 고장률 및 마모 특성을 소유한다.

이는 매우 중요하며, MIL-HDBK-217에서는 안정상태만을 고려한다. 그러나, 현실적으로 초년도 효과가 존재한다. 즉, 초기에 높은 고장률을 가지며 점차 안정적인 상태로 정착해 간다. 특별히, SR-332(2001)에서는 초기 고장률이 안정상태의 경우보다 4배까지 높고 고장률 감소 기간을 1년으로 고려한다. 동시에, 이후의 상수고장률 기간을 약 20년으로 보고 있다. 이는 마모 고장률 기간이 거의 없음을 의미한다. 그러나 대부분의 전기전자 부품의 경우 수명이 훨씬 짧을 뿐 아니라 불과 몇 년 후 부터는 마모로 인한 고장률 증가가 예상된다. 비록 순수 마모가 아닌 불안정한 전기적 특성으로 유발된다 하더라도 고장률이 증가하는 구간이 존재할 가능성이 높다. 상수고장률 기간이 짧을수록 초년도 및 마모기의 고장률 영향이 더 크다. 따라서, 초기의 높은 고장률 기간 및 마모 고장률 기간을 고려할 경우 보다 현실적인 결과가 도출될 수 있을 것이다.

### 6.5 설계상의 소자들과 실제 소자들이 다를 수 있다.

안정기 회로나 소자들의 정격들이 설계를 통하여 정의된 후 실제로는 이에 미치지 못하는 소자들로 대체되는 경우가 많다. 가장 큰 이유는 경제적인 이유이며 회로상의 일부 부품을 생략하거나 값싼 부품들로 대체하는 경우, 큰 신뢰성 편차를 유발하는 결과를 초래한다.

### 6.6 제조특성의 고려가 부족하다.

대부분의 연구에서 제조된 부품들의 초기 전기적 특성을 상수로 취급한다. 그러나, 한 제조공정으로부터 생산되는 제품들이 서로 다른 결과치를 가지므로

목적치로부터 다소의 편차를 수반하는 특성치를 가정함이 필요하다. 이는 모든 소자에 대한 공통으로 적용되며, 처음부터 설계상의 상수 특성치보다는 통계적인 특성 값으로 출발함이 필요하다. MIL-HDBK-217에서 고려하는 전자 부품들은 군납품들로 품질 수준이 매우 높아 공정 편차가 매우 작다고 가정할 때 상수로 취급함이 가능할 수는 있다.

이상의 고찰에 근거하여 MIL-HDBK-217이나 SR-332 등의 규격을 통한 결과를 순수 의사결정 기준으로 삼음에는 문제가 있다. 그러나, 비록 본 연구의 결과가 실제 안정기의 수명 특성을 현실적으로 적절히 반영하지 못한다 하더라도 향후의 신뢰도 연구에 좋은 기준 역할을 할 수 있을 것이다. 즉, 세계적인 품질 수준의 제조업체, 엄격한 기준에 의한 결과의 정의 등을 우리의 신뢰도 목표치로 삼아 노력해 감이 필요하며 이러한 측면에서 본 연구의 결과가 의의가 있다. 더 나아가 이들을 우리 실정에 맞도록 규정 자체를 수정하여 재설계 하는 것이 필요할 것이다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 저출력 형광등용 전자식 안정기 가운데 자려식에 대한 신뢰성 예측 모형을 MIL-HDBK-217을 이용하여 수립하였다. MIL-HDBK-217은 전기전자 부품의 신뢰성 예측에 있어 세계적으로 근간이 되는 대표적인 모형으로서 이를 통한 예측 또한 기업에 있어서는 제품 품질상의 중요한 기반을 제공한다.

## 참 고 문 헌

- [1] 전대보(2006), "Telcordia를 이용한 형광등용 전자식 안정기의 신뢰성 모형 수립", 「2006 한국품질경영학회. 춘계학술대회」, 인하대학교, pp. 69-75.
- [2] 전대보, 장목순, 박종연(2006), "형광등용 전자

식 안정기의 신뢰성 평가를 위한 접근", 「2006 한국품질경영학회 춘계학술대회」, 부산 벅스코, pp. 333-338.

- [3] Biswas, S. K. and Dhanuka, R. P.(1992), "Reliability of Electronic Ballasts in Industrial Fluorescent Lighting Applications", *Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1992 IEEE*, 4-9, Oct., Vol. 2, pp. 1915-1919.
- [4] MIL-HDBK-217F(1991), *Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment*, Department of Defense.
- [5] MIL-HDBK-217F Notice 1(1993), *Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment*, Department of Defense.
- [6] MIL-HDBK-217F Notice 2(1995), *Military Handbook, Reliability Prediction of Electronic Equipment*, Department of Defense.
- [7] Murphy, K. E., Carter, C. M., and Brown, S. O.(2002), "The Exponential Distribution: the Good, the Bad and the Ugly", *A practical guide to its implementation, Reliability and Maintainability Symposium, 2002 Proceedings*, Annual 28-31, Jan., pp. 550-555.
- [8] Shujuan, W., Hui, Z. and Hongliang, G.(2004), "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, Busan, Korea.
- [9] Telcordia Special Report(2001), *Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment* (document number SR-332, Issue 1), Telcordia Technologies.