

고압방전램프용 안정기의 신뢰도 모형과 분석 (Reliability Modeling and Analysis on the High Intensity Discharge (HID) Lamps Ballast)

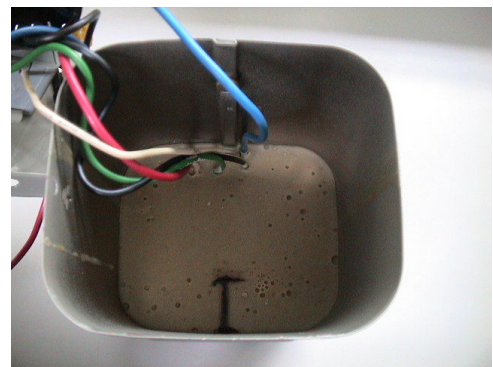
박태근, 이영주, 정희석, 김정수, 김진선, 천석희

(TaeKeun Park, YoungJoo Lee, HeeSuk Jeong, JeongSu Kim, JinSheon Kim, SukHee Chun)

한국조명기술연구소, 121-883 서울시 마포구 합정동 355-24

abstract

HID 램프란 High Intensity Discharge Lamps의 약어로서 고압 방전램프라 하고, 대규모 공간의 조명이 필요한 공공시설, 산업시설, 상업시설 이외에 스포츠 시설 등 폭넓은 용도에 대응하고 있다. HID 램프는 부성저항 특성으로 인하여 직접 전원에 접속하기 때문에 램프 전류가 흐르게 되면 급격히 전류가 증가하여 전류의 흐름이 매우 불안하게 된다. 따라서 이것을 안정시키기 위하여 전원과 램프사이엔 전류 제한장치인 안정기(Ballast)로 램프전류를 적절하게 제어할 필요가 있다. 본 고에서는 안정기를 구성하는 구성 재료와 부품이 사용 중에 주로 영향을 받는 것으로 생각되는 열화요인과 이에 대한 수명의 관계를 중심으로 안정기의 수명에 대해서 논하고자 한다.



<그림 1> 수명에 이른 안정기

1. 서론

고압방전램프용 안정기(이하 안정기)는 전기제품의 일종이며, 사용시간의 경과와 더불어 환경조건 등 여러 가지 요인으로 서서히 그 성능이 열화하고 마침내 수명에 이르는 성질을 가지고 있다. 실제적으로 안정기의 수명에 영향을 주는 요인은 온도, 전압, 습도, 주위의 유해물질, 기계적 진동과 충격 등이다. 또한 무부하시, 2차 단락시, SCR(Silicon Controlled Rectifiers) 오동작시 보호회로가 내장되지 않아 수명 단축의 원인이 되고 있다. 따라서 안정기의 수명은 지금 열거한 요인들이 복합적인 영향으로 인해 안정기의 수명이 결정된다(<그림 1> 참조).

(1) 고전압발생회로(이하 이그나이터 회로)형 (Cc : Chock Coil) 안정기로서 램프를 안정 점등시키는 초크코일과 램프를 시동시키는 이그나이터 회로 전압 발생회로와 역률을 개선하는 역률 개선용 커패시터 등으로 구성되어 있고, 램프를 시동시키는 이그나이터 회로는 약 800 ~

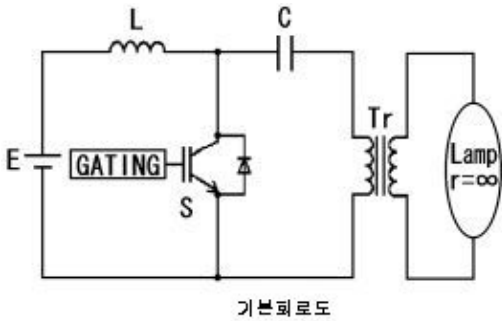


<그림 2> 안정기의 종류

1000 전압으로 램프가 시동되며 점등 후 이그나이터회로 동작은 정지하므로 취급이 간단하다. 안정기는 크게 2가지로 나눌 수 있다(<그림 2> 참조).

(2) PEAK 정전력형 안정기로서 특수한 철심에 의해 리드피크 전압이 발생하고 누설변압기의 2차측에 커패시터가 직렬로 접속되어 있으므로 변동률이 약 10%로 비교

적 우수하고 램프도 철심에서 발생하는 약 600의 피크전압으로 쉽게 점등된다. 전원 및 배선용량에 여유가 없을 때, 입력전압 변동률이 클 경우에 많이 사용된다. 또한 안정기는 회로방식으로서 자기회로식과 전자식으로 분류된다. 또 적합램프나 사용하는 장소 등에 의해 분류하며, 각각 구조나 구성부품에 따라 다른 부품이 사용된다. 그림 3은 고전압발생회로형 기본 회로도이다.



<그림 3> 고전압발생회로형 기본 회로도

본 고에서는 고전압발생회로 (Cc형) 안정기를 구성하는 대표적인 구성 재료와 부품이 사용 중에 주로 영향을 받는 것으로 생각되어지는 열화요인과 이에 대한 수명의 관계를 중심으로 안정기의 수명에 대해서 논하고자 한다.

2. 안정기에 의한 램프점등 동작 프로세스

안정기에 의한 메탈헬라이드 램프점등 동작 프로세스는 다음과 같다.

안정기에 전원이 공급되면 반도체 스위칭 소자인 이그나이터 회로와 권선, 커패시터에 의해 고전압의 펄스가 안정기의 2차측에 유기되고 이 펄스를 이용하여 램프 보조 전극간 또는 주전극간에 방전이 발생되어 주전극과 보조전극의 방전은 발광관 내를 방전이 쉬운 상태로 만들고 주전극간에 방전이 시작된다. 방전의 열로 발광관내의 수은, 아르곤가스, 각종 금속할로겐 화합물이 증발하게 되고 발광관 내부가 일정 온도로 상승하게 되면 바이메탈 스위치가 개방하게 되어 시동회로를 차단하여 이그나이터 회로에 의한 고전압의 펄스가 더 이상 유기되지 않는다. 발광관내의 증기압이 상승하면 램프전압, 전류가 안정되면서 램프는 정규의 밝기에 도달하게 된다.

3. 안정기의 수명

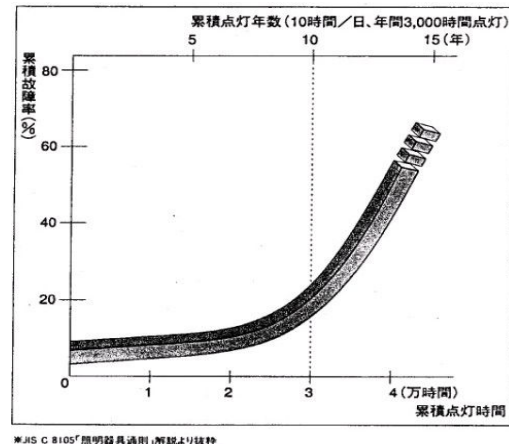
3.1 안정기의 주위온도, 표면온도, 내부온도

JIS 규격에 의하면 통상적인 온도상승은 다음과 같다. 주위온도(40℃ 이하), 표면온도(85℃), 내부온도(115℃)에서 주위온도가 상승하면 표면온도, 내부온도도 상승하고 최고 허용범위 온도의 한계를 넘어 절연물이 열화하고 수명말기의 상태로 된다.

전기절연 재료는 사용에 있어 화학적 열화를 생성하기 때문에 전기용품 기술기준에서는 그 한계를 40,000시간으

로 규정하고 있다. 조명기구에 있어 전기절연 재료의 열화가 문제가 되는 것은 안정기, 소켓, 전선 등이다. 정격전압, 상온에서 조명기구를 집단으로 사용하고 있는 경우의 사용 환경(또는 년수)과 누적고장률은 <그림 5>와 같다.

또한 전기용품안전기준의 전기절연재료의 한계(40,000H)는 평균적 내용(耐用)으로 생각이 되어 실제로는 부품으로 했을 때의 제조편차가 있고, 30,000H에서 마모고장으로 들어가게 된다(<그림 4> 참조).



<그림 4> 안정기의 내용(耐用) 시간(10,000Hr)

3.2 권선의 수명

안정기를 구성하는 부품 중 하나인 권선은 동작 시 흐르는 전류로부터 온도가 상승한다. 권선의 피막을 구성하는 재료는 폴리비닐 호르말 등 유기절연 재료로 열에 의한 전기 절연 성능이나 기계적인 성능이 열화하는 것으로 알려져 있다.

화학반응속도의 「반응속도계수」 k는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k = \left(\frac{d}{dt} \right) C \text{ -----(1)}$$

여기에서 k=반응속도 정수, C=반응에 의해서 생기는 생성물, t=시간.

절연물을 포함하는 대부분의 물질의 온도에 대한 수명은 「아레니우스법칙(Arrhenius Rule)」에 따르면 그 관계는 다음과 같다.

$$k = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \text{ -----(2)}$$

단, k : 반응속도 정수, A : 재료와 시험조건에 따르는 비열적 상수, Ea: 활성화에너지(activation energy, eV, R : 기체계수=8.3144 J/(K · mol), T : 절대온도(K)이다. 여기에서 활성화에너지는 반응에 고유한 상수이며 정상 상태에서 열화상태로 이행해 요구되는 에너지 크기를 말한다.

A와 Ea는 물질의 고유치이다. 고온이 되면 k가 크게 되어 반응이 빠르게 진행된다. 식 (1)과 (2)에서 k를 소거하

여 적분하면

$$C = A \cdot \int \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) dt \text{ ----- (3)}$$

이 되고, 열 열화로 생성되는 반응물질의 양이 열화의 정도를 나타내기 때문에 수명에 도달했다고 판단되는 C의 한계치를 C_e 로 하면 수명시간 t_e 는 다음과 같은 식을 만족하게 된다.

$$C_e = A \cdot \int_0^{t_e} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) dt \text{ ----- (4)}$$

여기에서 C_e 수명으로 판단되는 반응생성물의 양, t_e 수명시간을 말한다.

더욱이 전 사용기간에서 같은 온도를 유지한다고 한다면 T가 시간에 관계없이 일정하기 때문에 식 (4)는 간단히 적분할 수 있다.

$$C_e = A \cdot t_e \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \text{ ----- (5)}$$

즉, 수명에 이르기까지의 시간과 사용온도의 관계가 결정된다. 따라서

$$\log\left(\frac{C_e}{A}\right) = \log(t_e) - \frac{E_a}{RT} \text{ ----- (6)}$$

로 표현할 수 있기 때문에 가로축을 $1/T$, 세로축을 t_e 로 해서 전자를 보통 눈금, 후자를 대수눈금의 반대수 방안지로 플롯하면 직선의 기울기는 활성화에너지로 결정된다.

식 (6)의 직선의 기울기는 절연물의 경우 $8 \sim 10^\circ\text{C}$ 의 온도 상승에서 수명이 1/2이 된다는 사실이 알려져 있기 때문에 최고 허용온도에서 즉, 수명이 10년인 절연물은 $8 \sim 10^\circ\text{C}$ 높은 온도에서 사용하면 5년으로 단축하게 된다. 따라서 이 성질을 이용하면 재료의 품질평가를 단시간에 끝나게 하기 위해 「가속수명시험」과 사용온도가 변화할 때의 「수명예측」을 할 수 있다. 또한 일반적으로 전원전압이 높은 경우에도 권선온도의 상승을 유발하기 때문에 본래의 수명을 유지하기 위해서는 전원전압의 정격부근에서 사용하는 것이 바람직하다. 더욱이 서지전압을 높게 발생하는 개폐기의 사용을 피하거나 이그나이터 내장 안정기에 있어서 권선의 일부를 펄스 발생용의 트랜스로서 사용하는 것이 있기 때문에 램프가 수명으로 부점이 되었을 때에는 신속하게 램프를 교환하는 것이 안정기의 수명 면에서 중요하다. 안정기의 주위온도를 $30 \sim 40^\circ\text{C}$ 로 유지하고, 시험용 램프를 부하로 하여 안정기에 정격 주파수의 정격입력 전압을 가하여 각 부의 온도가 거의 일정하게 된 후 각 권선의 온도에 규정된 측정 위치의 온도상승을 측정한다. 권선 온도는 저항법으로 측정하고 다음 식에 따라 온도 상승값을 산출한다.

$$T = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (234.5 + t_1) - (t_2 - t_1) \text{ ---- (7)}$$

여기에서 T: 온도 상승값($^\circ\text{C}$), t_1 : 최초의 일정 주위 온도($^\circ\text{C}$), t_2 : 최종 주위 온도($^\circ\text{C}$), R_1 : t_1 ($^\circ\text{C}$)에서의 저항(Ω), R_2 : 온도가 일정하게 되었을 때의 권선의 저항(Ω).

3.3 커패시터의 수명

자기회로식 안정기에 역률 개선의 목적으로 사용되는 커패시터의 성능은 JIS C 4908에 전기자기용 커패시터의 규격으로서 정격통전 시간 40,000Hr으로 한 경우의 허용 온도가 클래스마다 결정되어 있다.

커패시터의 온도, 인가전압과 수명의 관계는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_2 = L_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right) \times 2^{\frac{T_1 - T_2}{k}} \text{ ----- (8)}$$

여기에서 L_1, L_2 : 온도 T_1, T_2 , 전압 V_1, V_2 에 있어서의 정격수명, n, k: 정수이다.

또 수명의 반감에 상당하는 온도차를 ΔT 로 하면 온도 T_0 에 있어서의 수명 L_0 와 온도 T에 있어서의 수명 L과의 사이에는 식 (8)을 변형한 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\frac{L}{L_0} = 2^{\frac{T_0 - T}{\Delta T}} \text{ ----- (9)}$$

일반적으로 커패시터에서는 $\Delta T = 7 \sim 8^\circ\text{C}$ 로 생각된다. 어쨌든, 권선의 경우와 동일하게 커패시터도 규정된 온도를 초과한 환경에서 사용하면 본래의 수명을 유지할 수 없게 된다.

전압에 관해서는 식 (9)와 같이 커패시터의 수명은 커패시터 사용 시 전압 V의 n승에 역비례의 관계가 있기 때문에 n의 값으로서는 9 ~ 11 정도로 생각되어진다.

3.4 기타 부품의 수명

안정기에는 금속재의 외함에 수납되어 있는 여러 가지 부품이 있다. 물 빠짐이 나쁜 폴딩이나 실내의 욕실 주위와 같은 습도가 높은 장소나 사용 시 부식성의 유해물질이 포함되는 장소에서 안정기가 사용되면 그 정도에 따라서 외함의 부식으로 절연물의 수명보다도 기계적인 성능에 관한 수명 쪽이 짧은 경우가 있다. 각종 환경 등을 고려하지 않았을 때 자기식 안정기의 수명은 앞에서 설명했듯이 10년으로 보고 있다. 안정기는 권선을 사용하여 자체 발열이 많이 발생하므로 권선의 절연이 서서히 파괴되면서 수명에 이르게 된다. 즉 역률 보상 목적으로 삽입된 진상용 전해 커패시터의 과열로 인하여 수명이 단축될 수 있다. 램프가 없거나 이상 상태에서 이그나이터 회로가 계속 동작하여 고전압 펄스가 지속적으로 발생하여 결국은 안정기 파손의 주원인이 된다.

4. 안정기 고장률에 근거한 신뢰성 실증시험

안정기는 회로방식에 의한 차이는 있으나 자기 회로식 안정기는 크게 권선, 이그나이터 회로, 규소장판, 커패시터, 인출선, 외함, 충전재의 주요 부품으로 구성되어 있다. 이중 권선은 램프를 안정시키는 역할을, 이그나이터 회로는 램프를 시동시키는 역할을, 커패시터는 역률을 개선하는 역할을, 충전물로는 열경화성 합성수지로 충전되어 절연 및 내전압 내구성에 우수하다. 여기에서 시험한 안정기의 기본사양은 표 2와 같다.

표 2 안정기의 기본 사양

규격 (W)	입력전압 (V)	입력전류 (A)	입력전력 (W)	역률 (%)
250	220	1.35	272	90

4.1 가정조건과 용어

시스템을 구성하고 있는 n개의 부품 중 어느 하나라도 고장이 발생하면 시스템 전체가 기능이 상실하게 되도록 부품이 결합되어 있는 직렬구조는 부품과 시스템의 고장 시간 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$X = \min \{X_1, X_2, \dots, X_n\} \text{-----}(10)$$

각 부품의 고장시간은 서로 독립이기 때문에 식 (10)에서 시스템의 신뢰도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R(t) = R_1(t) \times R_2(t) \times \dots \times R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \text{-----}(11)$$

단, R(t)는 시각 t에서의 시스템의 신뢰도함수, R_i(t)는 시각 t에서의 i(=1,2, ..., n)번째 부품의 신뢰도이다.

만약 각 부품의 신뢰도가 지수분포를 따를 경우, 안정기 시스템의 신뢰도는 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$R(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n)t} = e^{-\lambda t} \text{-----(12)}$$

여기에서 $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ 이다.

또한 MTTF(Mean Time to Failure)는 고장률의 역수이다.

$$MTTF = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \text{-----}(13)$$

또는 만약 동일 부품이면

$$MTTF = \frac{1}{n\lambda} \text{-----}(14)$$

이다.

주어진 시간의 신뢰도는 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$R(t) = e^{-t/MTTF} \text{-----}(15)$$

수명분포가 지수분포를 따른다고 가정한다면 단위시간당 발생하는 고장개수는 포아송분포를 따른다. 총시험시간 T의 시험을 행하고, 식 (16)과 같은 누적포아송 분포를 이용하여 최소 MTTF를 보증할 수 있다.

$$L(\lambda) = \sum_{r=0}^c \frac{(\lambda T)^r e^{-\lambda T}}{r!} \leq \alpha \text{-----}(16)$$

여기에서 L(λ)는 λ의 시스템을 보증할 수 있는 확률, c는 합격판정 개수, α는 유의수준이다. 단, 1 - α는 신뢰수준이다.

그리고 χ²분포를 사용하여 T를 구하면 다음과 같다.

$$T = \frac{\chi^2(2(c+1), \alpha)}{2\lambda} \text{-----}(17)$$

직렬구조의 안정기에 대한 신뢰도는 식 (12)를 이용하여 구하면 되므로 먼저 식 (12)를 이용하여 각 부품의 신뢰도를 계산한 후 식 (11)을 이용하여 신뢰도를 계산할 수 있다. 또한 식 (13)~(14)를 이용하여 계산할 수 있다.

4.2 안정기의 신뢰도 분석

식 (6)의 중요한 응용으로서 「가속수명시험 (accelerated aging)」이 있다. 이 시험은 실제의 사용 온도보다 높은 온도에서 열화특성을 조사하는 것으로 장기간 사용되는 재료의 품질평가를 단시간에 끝내도록 하는 수법을 말한다.

물론 시험온도는 화학반응의 메커니즘이 변하지 않는 범위이어야 하고, 권선온도 100℃에서 8~10℃ 상승으로 수명이 1/2이 되기 때문에 110℃의 온도이면 1/128의 시간에서 끝마칠 수 있기 때문에 제조 로트 단위의 검사에서도 실제로 이용할 수 있다.

정격전압에서 1일 10시간 점등 시와 연속점등시 안정기의 수명특성은 각각 표 3~4와 같다.

<표 3> 정격전압에서 1일 10시간 점등시 안정기의 수명

권선온도	100	110	120	130	140	150
년(개월)	10(0)	5(0)	2(6)	1(3)	0(7)	0(4)
수명(1,000)	86	43	21	10	5	3

<표 4> 정격전압에서 연속점등시 안정기의 수명

권선온도	100	110	120	130	140	150
년(개월)	4(0)	2(0)	1(0)	0(6)	0(3)	45일
수명(1,000)	35	17	9	4	2	1

대상

시스템에 대한 수명분석을 실시하는 경우에 있어 신뢰성 평가는 Bx의 수명, 즉 X%에 이르는 수명을 보증하기 위한 시험시간을 사전에 추정하는 것이 매우 중요하다. 수명 Bx의 추정은 다음과 같다.

만약 지수분포를 따를 경우, 식 (12)에서 R(t) = e^{-λt}이므로 양변에 대수를 취하면

$$\ln R(t) = -\lambda t \text{-----}(18)$$

가 된다. 따라서

$$t = -\frac{\ln R(t)}{\lambda} \text{-----}(19)$$

이다.

정격전압에서 연속점등시 안정기의 수명이 지수분포를 따르는 안정기가 독립적으로 구동하는 경우

$\lambda = 4.0 \times 10^{-5}$, $c=0$, $\alpha=90\%$ 로 하면 식 (17)에서

$$T = \frac{\chi^2(2, 0.1)}{2 \times 3.0 \times 10^{-5}} = 80,761 \text{ -----(20)}$$

즉, 최소 MTTF=35,040Hr을 보증하기 위한 총 시험시간은 80,761Hr이다. 한편, 시험시간을 1,000Hr(42日)로 한다면 안정기의 최소개수는 81개 필요하다.

고장률이 일정하다고 가정한다면 어떤 시험시간의 조합에도 상관이 없다. 그러나 수명분포가 완전히 지수분포를 따른다는 경우를 시험이 시작하기 전에 보증할 수 없기 때문에 최소의 시험시간을 우선적으로 결정하는 작업이 필요하다.

더욱이 시험시간을 1,000Hr로 실시했을 경우 81개의 안정기에 대한 B10 수명은 식 (19)를 이용하면

$$t_{0.10} = -\frac{\ln(1-0.10)}{3.0 \times 10^{-5}} \approx 3,692 \text{ Hr -----(20)}$$

이다. 즉, 안정기 81대 중 10%가 고장이 발생할 수명은 대략 3,692Hr(154일)로 추정할 수 있다.

여기에서 합격판정 개수는 시료수를 적게 하기 위해 $c=0$ 으로 가정했다. 이것은 현재 업체에서도 시료수를 최소로 하기 위해 일반적으로 채택하고 있는 개수이고, 규격 즉, MIL - REF - 19500에도 활용하고 있다.

<표 4>의 근거로 고장률 수준별 시료수를 구해 보면 <표 5>와 같다.

<표 5> 정격전압에서 연속점등 시 권선의 온도에 따른 고장률수준 (시험시간 : 1,000, $c=0$)

권선온도	고장률수준	시료수	B10(Hr)
100	3.0×10^{-5}	81	3692
110	6.0×10^{-5}	40	1843
120	11.0×10^{-5}	20	923
130	23.0×10^{-5}	10	461
140	46.0×10^{-5}	5	231
150	91.0×10^{-5}	3	115

한편, 안정기 $n=30$ 를 가지고 신뢰성시험을 행할 경우 평균권선온도마다의 시험시간과 가속계수는 <표 6>과 같다.

<표 6> 30개의 안정기의 경우 권선온도에 따른 시험시간

권선온도	시험시간(Hr)	가속계수
100	2,620	1.00
110	1,346	2.21
120	673	4.70
130	337	9.68
140	168	19.28
150	84	37.22

5. 마치며

본 고에서는 HID 램프용 안정기의 종류와 특성을 알아보았다. 특히 이그나이터 회로형 안정기의 각각을 구성하는 주요부품의 수명을 중심으로 논했다. 안정기의 수명을 연장시키는 방법으로서 각 부품마다 여유를 부여하는 방법을 생각해 볼 수 있으나 이것은 안정기에 대한 필요 이상의 대형화, 중량초과를 야기하며, 경제성과 자원의 절약화의 의미로부터 바람직하지 못하다. 부품 업체에 의한 회로 기술, 발열, 절연기술 등의 개량에 의해 방전램프 안정기의 장수명화가 달성되리라 생각된다.

참고문헌

- [1] 한양대학교 신뢰성분석 연구센터, “고장분석 전문기술 교육 - 수동부품의 고장분석,” 신뢰성분석 연구센터 (2004).
- [2] 신승훈, “와이블 차트와 가속시험”, 과학기술 (2003)
- [3] 寺山一郎, “安定器の寿命”, 日本照明学会誌, Vol. 85 No. 9, pp. 757-759(2001)
- [4] 澤田 清, 三道 弘明, “ソフトウェアの信頼性實證試験方式”, 日本オペレーションズ・リサーチ, Vol. 44 No 8, pp. 415-419 (1999)
- [5] 이영주, “일반조명시스템의 신뢰성 평가를 위한 고장 수명분포 및 보증수명 연구고찰”, 등지, (2003.12 ~ 2004.02)
- [6] 박태근, “HID 램프의 최근의 동향”, 등지, (2004.10 ~ 2004.11)
- [7] 東芝ライテック, 技術解説, (2005)