안정기 설계를 위한 콤팩트 형광램프 모델링

(Modeling of a Compact Fluorescent Lamp for Ballast Design)

이 진 우*
(Chin-Woo Yi)

요 약

본 논문은 저압 수은-아르곤 기체방전을 이용하는 콤팩트 형광램프에 대한 모델링으로서 방전관 내 기체의 반경방향 입자밀도 변화를 고려한 입자평형식, 에너지보존식 및 회로방정식 등의 모델 방정식을 구성하여 이를 상용전원 구동회로와 결합한 13[W] PL 콤팩트 형광램프에 적용하였다. 계산된 전류와 램프전압의 실효치 및 파형을 실험치와 비교하여 모델이 타당함을 보였다.

Abstract

A compact fluorescent lamp using low pressure mercury-argon discharge has been successfully modeled by employing radial variation of particle density and considering driving circuit effects on the characteristics of discharge process. This model applies AC 220[V] driving 13[W] PL compact fluorescent lamp. Experiments were performed to varify numerical results by comparing experimental results of the current and lamp voltage wave forms of the compact fluorescent lamp. The results show the effective value of current and lamp voltage within ±6[%], and the similar current-voltage wave form.

1. 서 론

저압 수은-아르곤 방전등, 즉 형광램프는 저압기체방전의 대표적인 예이다. 이러한 형광램프가 발전되던 중 발광효율이 낮고, 수명이 짧은 백열전구를 형광램프로 대체하기 위한 콤팩트 형광램프가 개발되었다. 콤팩트 형광램프는 백열전구와 동일한 밝기를 내는데 소비전력이 25[%]정도 밖에 되지 않아 에너지절약에 크게 기여하고 있다.

그러나 기체방전은 전압-전류특성이 비선형적이고 부특성인 관계로 해석 및 결과의 예측이 대단히 힘들며, 또한 방전을 램프에 이용하는 경우 회로조건도 함께 만족시켜야 하므로 해석 및 결과 예측은 더욱 어렵게 된다. 그리하여 지금까지의 개발 방법은 경험과 시험제작을 통하여 이루어 졌으나, 방전에 대한 근원적인 이해가 가능하다면 이용하는 방전

*정회원 : 호서대 공대 전기·전자·제어공학부 교수
접수일자 : 1996. 12.4

을 보다 양호한 특성을 갖도록 개선하고, 더 나아가 새로운 종류의 기체방전을 이용하는 것도 가능할 것이다.

이와 같은 콤팩트 형광램프는 방전램프의 특성이 사용하는 기체와 봉입물질, 방전용기의 구조, 인가전압 주파수 및 파형, 주위온도의 변화와 한류소자의 종류 등에 따라 달라지므로, 이러한 영향을 동시에 고려하여 방전램프의 특성을 예측할 수 있는 모델들이 연구되었다. 뿐만아니라 방전램프의 전기적, 물리적 특성을 표현하기 위하여 여러가지 수식모델이 제안되었다. 이들은 다음과 같이 분류할 수 있다.

등가콘덕턴스 모델로 방전램프의 전기적 특성을 시뮬레이션하는 방법이 있다. 이 방법은 모델방정식을 구성하는 항에 대한 이론적근거가 희박하고, 램프전압과 전류의 변화만을 계산하므로, 일반적인 방전램프의 해석에는 한계가 있다.[1)2)]

에너지평형식을 이용하여 회로방정식과 함께 시뮬레이션하는 방법은 이론적 근거가 명확하고 고찰방법이 뛰어나지만, 에너지평형식 중의 방사에너지를 온도의 함수로 정확히 표현하는 것이 어렵고 계산이 대단히 복잡하게 된다.[3)]

이러한 단점을 보완하기 위하여 방전관 내부에서 일어나는 전기적, 열역학적 현상을 단순화시켜서 방전관 내의 기체온도에 대한 시간적 변화가 전기적 입력에너지와 방사 및 전도에 의한 손실에너지와의 차에 비례한다고 가정하여, 이를 방전관 전체에 대한 에너지평형원리에 따라 결합시키는 모델을 구성하였다. 이 모델은 간편하게 사용할 수는 있으나 방전램프 내의 온도분포를 고려하지 않았으며, 온도방사 및 공진선의 자기흡수 현상을 무시 하였다.[4)]

방전기체의 에너지레벨을 고려하여, 방전관내의 전자, 기저상태 및 여기상태의 원자에 대한 입자평형식과 전자의 에너지평형식을 구성하고, 이로부터 방전관의 물리적, 전기적 특성을 구하는 방법도 사용되고 있다.[5)6)]

수치해석을 이용하지 않고, 해석적인 방법을 사용하여 방정식의 해를 구하는 방법으로, 대체로 전리평형식, 여기원자에 대한 입자평형식 및 전자에너지평형식을 이용하고, 전자이동도를 간단한 형태로 표현하여, 방전변수 사이의 수식적인 관계를 구하는 것이다. 이러한 연구들은 해석적인 해를 얻기 위하여 많은 가정을 사용하고 있으며, 그 중에서도 방전관 내의 전자밀도 또는 방전전류의 변화에 관계없이 전자온도가 일정하다고 가정한 점과 이에 따라 각종 천이확률계수가 일정하게 된다는 점은 이론적인 근거를 약화시키는 사항으로 지적되고 있다.[7)]

모든 저압기체방전은 열역학적 평형상태로 부터의 일탈의 정도가 심하며, 완전한 자속방전이거나 자속방전에 가깝다는 공통점을 지니고 있다. 따라서 저압기체방전은 빛을 발산하며, 자속적인 불평형 기체방전이라고 정의할 수 있다.

본 논문에서 논의하려는 모델은 콤팩트 형광램프의 구부러진 형상을 고려한 교류모델로서 저압기체방전에 대한 반경방향분포를 고려한 입자평형식 및 에너지보존식을 구성하고 이를 방전등의 회로방정식과 연결하여 연립미분방정식의 해를 구함으로서 콤팩트형광램프의 전류와 관전압특성들을 해석하려고 한다.

2. 이론적 모델링

2.1 가정

방전플라즈마 내의 전자는 수은원자와 아르곤원자와만 충돌한다. 즉, 원자 간의 충돌과 전자 간의 충돌은 무시한다. 아르곤원자의 최저 여기레벨에너지는 수은의 이온화레벨보다 훨씬 높으므로 전자와 아르곤원자는 탄성충돌만을 한다. 전자는 Maxwellian 에너지분포를 갖는다. 전자온도는 반경방향에 관계없이 일정하다. 방전관 내의 플라즈마는 축방향으로 균등하며, 축에 대하여 대칭이다. 기체온도는 반경방향에 관계없이 일정하다. 기저상태의 수은원자는 반경방향에 관계없이 일정하며, 수은원자밀도는 관벽온도에 따라 결정된다. 방전관의 음극 및 양극전압강하는 양광주 전계에 비례한다. 본 논문에서 고려한 수은의 여기에너지 준위는 $Hg(6^1P_1)$, $Hg(6^3P_0)$, $Hg(6^3P_1)$와 $Hg(6^3P_2)$이며, Hg_2^+와 공간 중의 재결합은 무시하였다. 따라서 플라즈마는 유극성확산에 의하여 지배된다.[8)]

2.2 방전의 모델링

2.2.1 전자의 에너지분포

Maxwellian 에너지분포함수 $f(E_e)$는 다음의 식으로 나타난다.

$$f(E_e)=\frac{2\sqrt{E_e}}{\sqrt{\pi}(k\ T_e)^{1.5}}\exp\left(-\frac{m_e\ v_e^2}{2k\ T_e}\right)$$

여기에서, E_e : 전자의 에너지
k : 볼쯔만 상수
T_e : 전자온도
m_e : 전자 질량
v_e : 전자의 속도.

2.2.2 전자이동

에너지를 전달하는 충돌주파수 V_{coll}은 다음의 식을 사용하였다.[9]

표 1. 불활성기체 중에서의 수은 이온의 이동도와 이온과 여기원자의 확산계수(0[℃], 1[Torr])
Table 1. Mercury ion mobility and diffusion coefficients of ion and excited atom in rare gases (0[℃], 1[Torr])

	He	Ne	Ar	
μ_i	14200	4310	1340	cm²/volt.sec
D_i	334	101.5	31.5	cm²/sec
D_p, D_r, D_s	455	161	70.8	cm²/sec

$$v_{coll}=v_0^*p\left(\frac{k\ T_e}{q}\right)^{h/2}$$

여기에서, 0^* : $15\times10^8[s^{-1}\ V^{-1.65}\ torr^{-1}]$
p : 불활성기체 압력 [torr]
q : 전자의 전하량
h : 상수

본 논문에서는 수은 증기를 고려하여 구한 전자이동도 μ_e는 다음과 같다.

$$\mu_e=2.05\times10^8\times Te^{-1.55}$$

2.2.3 에너지 손실비율

방전 중의 탄성충돌은 대부분 전자와 아르곤기체와의 충돌에서 일어난다고 가정하면, 탄성충돌 1회당 전자의 에너지 손실비율 χ는 다음의 식으로 주어진다.

$$\chi=\frac{2m_e}{M_{Ar}}$$

여기에서, m_e : 전자질량
M_{Ar} : 아르곤원자의 질량.

2.2.4 수은원자의 에너지준위

본 논문에서는 수은의 기저준위와 6^1P_1, 6^3P_0, 6^3P_1, 6^3P_2 및 이온화레벨을 고려하여 모델을 구성하였다. 각 에너지준위을 기저준위는 g, 6^1P_1은 p, 6^3P_0는 q, 6^3P_1은 r, 6^3P_2는 s, 그리고 이온화준위는 i로 표시하였다.

2.2.5 여기와 이온화

x준위에서 y준위로의 천이확률 K_{xy}는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_{xy}=<\sigma_{xy}(v_e)v_e>$$
$$=\frac{1}{n_e}\int_0^\infty\sigma_{xy}(\varepsilon)\frac{\sqrt{2\varepsilon}}{\sqrt{m_e}}f(\varepsilon)d\varepsilon$$

여기에서, σ_{xy} : 원자의 충돌단면적
n_e : 전자의 밀도
ε : 입자의 에너지.

2.2.6 공진방사수명

본 논문에서 사용한 r준위 여기원자의 실효방사수명값 τ_{reff} 및 p준위 여기원자의 실효 방사수명값 τ_{reff}는 다음과 같다.[10]

$$\tau_{reff}=9.72\times10^{-6}[sec]$$
$$\tau_{peff}=6.63\times10^{-7}[sec]$$

2.2.7 여기원자와 이온의 확산

여기원자는 자유확산(free diffusion)을 하는 반면, 이온은 유극성확산을 한다. 그러므로 이온의 확산계수 D_i는 유극성확산계수 D_a와 같은 값을 가지며, 여기원자의 확산계수는 에너지준위에 관계없이 모두 같다. 따라서 여기원자의 확산계수를 D_r라 한다. 0[℃], 1[torr]에서의 각종입자 확산계수는 표 1과 같다.

2.2.8 입자평형식

q준위의 시간당 밀도변화 n_q는 다음의 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial}{\partial t}n_q(r,t) = -Dn_f\nabla^2 n_q(r,t) + n_e(r,t)\{K_{gq}n_g + K_{rq}n_r(r,t) + K_{sq}n_s(rt) - (K_{qg}+K_{qr}+K_{qs}+K_{qi})n_q(r,t)\}$$

r준위의 시간당 밀도변화 n_r은 다음의 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial}{\partial t}n_r(r,t) = -D_f\nabla^2 n_r(r,t) + n_e(r,t)\{K_{gr}n_g + K_{qr}n_r(r,t) + K_{sr}n_s(r,t) - (K_{rg}+K_{rq}+K_{rs}+K_{ri})n_r(r,t)\} - \frac{n_r(r,t)}{\tau_{reff}}$$

s준위의 시간당 밀도변화 n_s는 다음의 식으로 주어진다.

$$\frac{\partial}{\partial t}n_s(r,t) = -D_f\nabla^2 n_s(r,t) + n_e(r,t)\{K_{gs}n_g + K_{qs}n_q(r,t) + K_{rs}n_r(r,t) - (K_{sg}+K_{sq}+K_{sr}+K_{si})n_s(r,t)\}$$

p준위 여기원자밀도는 q, r, s준위 여기원자밀도에 비하여, 1~2〔%〕정도로 작고, 또한 다른 에너지준위 사이의 천이 관계가 정확하게 규명되어 있지 않으므로, 입자평형식에서는 제외시켰다. 그러나 그 에너지양은 무시할 수 없으므로 r준위 방사의 10〔%〕로 가정하여 에너지보존식에서는 포함시켰다.

전자의 시간당 밀도 변화 n_e는 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}n_e(r,t) = -D_a\nabla^2 n_e(r,t) + n_e(r,t)\{K_{gi}n_g + K_{qi}n_q(r,t) + K_{ri}\,n_r(r,t) + (K_{si}\,n_s(r,t)\}$$

2.2.9 에너지보존식

저압 수은-네온 혼합기체방전 내에서는 외부에서 주어지는 에너지를 거의 전자가 얻고, 외부로 유출되는 에너지는 전자가 얻은 에너지를 전자가 직접 소비하거나 기체원자에 전달하여기체원자가 소비하므로 에너지평형식은 전자에 대하여만 성립시키는 것이 가능하다.

방전램프에 인가된 전계에 의하여 전자가 에너지를 얻고, 전자는 아르곤원자와의 탄성충돌과 수은원자와의 비탄성충돌 및 여기시킨 수은원자의 방사에 의하여 에너지를 잃는다. 또한 기체온도와 전자온도를 반경방향에 무관하다고 가정하였으므로, 열전도에 의한 에너지소비는 없다.

$$\frac{d}{dt}\{n_e(0,1)\,U_e(t)\} = n_e(0,t)\{U_e(t) - U_g\} + \mu_e\{F(t)\}^2 + \sum_{x,y}K_{xy}n_x(0,5)\triangle U_{xy}]$$

여기에서, $U_e(t)$: 전자의 평균에너지

U_g : 아르곤 원자의 평균에너지

$F(t)$: 방전램프 내의 전계

$\triangle U_{xy}$: 에너지준위 간 에너지차이

$\triangle U_{rg}$: $6^3P_1(r)$준위과 $6^1So(g)$ 준위 간의 에너지 차이

2.2.10 경계조건

본 논문에서 사용한 경계조건은 다음과 같다.

$$\left.\frac{\partial n_q}{\partial r}\right|_{r=0} = \left.\frac{\partial n_r}{\partial r}\right|_{r=0} = \left.\frac{\partial n_s}{\partial r}\right|_{r=0} = \left.\frac{\partial n_e}{\partial r}\right|_{r=0} = 0$$

$$n_q\Big|_{r=R} = n_r\Big|_{r=R} = n_s\Big|_{r=R} = n_e\Big|_{r=R} = 0$$

$$n_g = N_{llg}(T_w)$$

관벽온도 T_w는 325〔K〕로 가정하였다.

2.2.11 회로방정식

형광램프와 인덕턴스안정기를 직렬로 연결하여 전원을 인가하는, 회로방정식은 다음 식으로 표현된다.

$$L\frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + v_l(t) = v_s(t)$$

여기에서, L : 안정기의 인덕턴스

R : 안정기의 저항

i(t) : 전류

표 2. 램프전압 및 전류의 실효치 비교
Table 2. Comparision of RMS values of current and lamp voltage

항 목	계산치	실험치	비 율
램프전압 실효치	57.0[V]	59.5[V]	95.8[%]
전류 실효치	281[mA]	298[mA]	94.3[%]

$v_l(t)$: 램프전압

$v_s(t)$: 전원전압

회로방정식에서 문제가 되는 항은 램프전압 $v_l(t)$인데, 램프전압은 양광주의 전압에 양극 및 음극전압강하를 합한 양이다. 그런데 글로우방전에서는 양극전압강하는 음극전압강하에 비하여 무시할 수 있는 정도이며, 음극전압강하의 크기는 10[V], PL 램프에서 관이 굽은데 따른 전압손실을 20[V]로 가정하여 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$v_l(t) = F(t) \times 0.5$$

여기에서, F(t) : 양광주 전계의 세기.

본 논문에서 사용한 13[W] PL 램프의 관경은 12.5[㎜], 방전부 길이는 25[㎝], 회로소자값은 안정기의 인덕턴스가 1.86[H], 저항이 54[Ω]이다.

3. 수치계산 및 계산결과

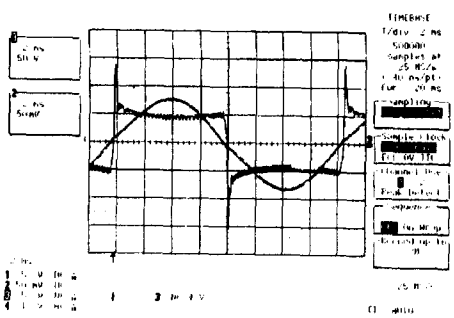
위에서 구성한 방정식은 4개의 편미분방정식과 2개의 상미분방정식의 연립방정식으로 구성된다. 본 논문에서는 편미분방정식에는 양적차분근사법을 상미분방정식에는 2nd order Runge Kutta method를 사용한 혼합방법을 사용하여 해를 구하였다. 시간에 대하여는 초기치문제로, 반경방향에 대하여는 경계치문제로 보고 구한 해의 변화가 0.01[%]이내가 될 때까지 반복계산하였다.[11]

본 논문에서 계산한 결과와 실험치를 표 2 및 그림 1에서 비교하였다.

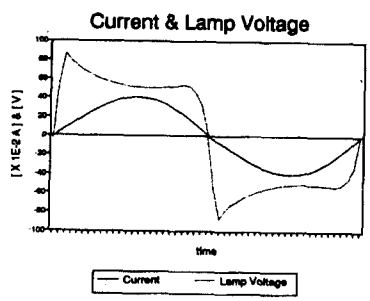
4. 결 론

본 연구에서는 수은-아르곤 기체방전에 대하여 상세한 모델을 구성하였고, 특히 회로방정식과 반경방향 입자밀도 변화를 모델링에 고려하였다.

구성한 모델을 전자에너지는 Maxwellian분포로 가정하고, 전자의 전계방향 이동과 관벽으로의 이동은 전자에너지의 함수로 표현하여 콤팩트 형광등에 적용하였다. 수은원자의 에너지 상태는 대표적인 6개 준위를 고려하였고, 원자의 여기와 이온화비율은 전자에너지의 함수로 표현하여 여러 개 구간으로 나누어 구간별로 선형화 시켜 계산하였다. 실효방사수명을 사용하여 253.7nm 방사를 표현하였으며, 185nm 방사는 입자평형식에서 고려하지 않고, 에너지보존식에서만 고려하였다. 경계조건으로 축에서는 Dirichlet condition을 관벽에서는 Neumann condition을 사용하였다. 보다 실제적인 모델링을 하기 위하여 램프에 구동회로를 결합하는 회로방정식을 사용하여, 실제 시스템에서 보다 유용한 결과를 얻을 수 있었다.



(a) 전류 및 램프전압 파형 실측치



(b) 전류 및 램프전압 파형 계산치

그림 1. 전류 및 램프전압 파형의 비교
Fig. 1. Comparision of waveforms of current and lamp voltage

전류 및 램프전압의 실효치와 전류 및 램프전압과 형은 표 2와 그림 1에 나타난 것처럼 실제의 경우와 매우 유사하였다.

이상에서 본 연구의 모델링이 콤팩트 형광램프의 경우에 적합함을 알 수 있다.

앞으로의 연구과제는 실효방사수명의 정확한 계산 및 저전류영역에서 사용할 수 있는 전자에너지 분포함수의 개발 및 고전류영역을 포괄 할 수 있는 중성원자 및 기체온도의 변화를 고려하는 모델링이 필요하며, 가장 난제로 여겨지는 음극 및 양극전압강하에 대한 정확한 이론에 관한 연구가 필요하다고 사료된다.

참 고 문 헌

1) Peek, S. C., Spencer, D. E., "A differential equation for the fluorescent lamp", Illuminating Engineering, pp. 157~166, April 1968.
2) Wani, K., "A simulation model for the Hg-Ar positive column applicable to the fluorescent lamp discharges", J.Illum. Eng. Inst. Jpn., Vol. 71, No. 2, pp.22~ 27, 1987.
3) Lowke, J. J., Zollweg, R. J., "Theoretical prediction of ac characteristics of mercury arc lamps", Journal of IES, pp. 253~259, July 1975.
4) Laskowski, E. L., Donoghue, J. F., "A model of a mercury arc lamp's terminal V-I behavior", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-17, No. 4, pp. 419~426, 1981.
5) Verbeek, T. G., Drop, P. C., "The positive column of low-pressure Hg/Ne and Hg/Ne/Ar discharges", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 7, pp. 1677~1683, 1974.
6) Vriens, L., "Energy balance in low-pressure gas discharges", J. Appl. Phys., Vol. 44, No. 9, pp. 3980~3998, 1973.
7) Lama, W. L., Gallo, C. F., Hammond, T. J., Walsh, P. J., "Analytical model for low-pressure gas discharges: application to the Hg+Ar discharge", App. Opt., Vol. 21, No. 10, pp.1801~1811, 1982.
8) Drop, P. C. and Polman, "Calculations on the effect of supply frequency on the positive column of a low pressure Hg-Ar ac discharge", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.5, pp. 562~568, 1972.
9) Verweij, W., "probe measurements in the positive column of low-pressure mercury-argon discharges", Physica, Vol. 25, pp. 980~987, 1959
10) Holstein, T., "Imprisonment of resonance radiation ing gases", Phys. Rev., Vol. 72, No. 12, pp. 1212~1233, 1947.
11) 김창효, "數値解法과 電算프로그래밍", 교학사, 1988.

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 전력기술 기초연구(과제관리번호 : 95-100) 지원에 의하여 수행되었음.

◇著者紹介◇

이 진 우(李鎭雨)

1961년 2월 4일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸. 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸(석사). 1990년 서울대 대학원 전기공학과 졸(박사). 세명백트론(주) 연구실장. 현재 호서대 공대 전기·전자·제어공학부 조교수. 당학회 이사