

LCD 백라이트용 외부전극 형광램프의 인버터 회로 해석

정종문·신명주·이미란·김가을·김정현·김상진·이민규·강미조·신상초·
안상현·길도현·유동근·구제환·강준길·최은하·조광섭*

광운대학교 전자물리학과, 서울 139-701

(2006년 10월 27일 받음)

외부전극 형광램프를 광원으로 하는 백라이트의 저항(R_L)과 전기용량(C), 그리고 인버터의 트랜스포머 인덕턴스(L)로 구성된 회로를 분석하였다. 램프의 저항과 전기용량은 램프에 흐르는 전류와 전압의 위상차 및 Q-V 그래프에서 결정된다. 32인치용 EEFL 램프 하나의 저항 값은 66 k Ω 이고 전기용량은 21.61 pF이다. 20 개의 EEFL을 병렬 연결한 백라이트의 저항은 3.3 k Ω 이고 전기용량은 402.1 pF이다. 램프 및 트랜스포머 회로에서 임피던스 매칭 주파수는 2 차 코일의 인덕턴스 L_2 와 결합계수 k 로 나타내며, $\omega_m = 1/\sqrt{L_2 C(1-k^2)}$ 이다. 램프 시스템의 전류와 전압은 임피던스 매칭 주파수에서 최대값을 갖는다. 이러한 해석 해의 결과는 실험 결과와 잘 일치한다.

주제어 : 외부전극 형광램프, 백라이트, 인버터, 임피던스 매칭, 트랜스포머

I. 소 개

외부전극 램프는 1960년도 방전 연구 초기에 대두되었다[1-4]. 그 이후 최근에 이르러 외부전극 형광램프(external electrode fluorescent lamps : EEFLs)와 이를 광원으로 하는 백라이트에 대한 연구가 2000년부터 소개되었다[5-14]. 최근에 이르러 EEFL-백라이트를 장착한 32인치 및 37인치 LCD-TV가 상용화되었다. 현재 가장 널리 쓰이는 냉음극 형광램프(cold cathode fluorescent lamps: CCFLs)를 광원으로 하는 직하형 백라이트는 CCFL을 개별 구동하는 방식을 주로 사용하며, 램프 수에 해당하는 개수의 인버터가 백라이트의 후면에 장착되어 있다. 그러나 EEFL은 다수 개의 램프를 병렬 연결하여 하나의 인버터로 구동하는 것을 특징으로 한다.

램프를 개별 구동 시에는 하나의 램프에 대하여 10 W 미만의 전력을 요하는 인버터를 사용한다. 그러나 32인치 이상의 대면적 백라이트의 구동에서는 100 W 이상의 대전력을 인버팅하는 기술이 필요하다. 일반적으로 백라이트 구동용 인버터의 핵심 부품의 하나가 트랜스포머(transformer)이다. 이러한 트랜스포머는 수십 V의 입력 전압을 램프의 구동 전압인 약 1 KV의 교류로 변환하는 소자이다. 또한 트랜스포머는 대면적 백라이트를 구동하기 위하여 100 W급의 대전력을 감당한다. 이때 트랜스포머의 1차측 및 2차측 코일의 회선 수는 인덕턴

스의 값을 결정하며, 이러한 인덕턴스는 트랜스포머가 감당하는 전력뿐만이 아니라 램프 시스템과의 임피던스 매칭(impedance matching)과 관련하여 매우 중요하다. 임피던스 매칭은 램프 시스템의 리액턴스(reactance)인 저항(resistance), 램프의 전기용량(capacitance), 그리고 트랜스포머 인덕턴스(inductance)의 값으로 주어지는 구동 주파수로 정해진다.

본 연구에서는 EEFL 램프 시스템의 저항 및 전기용량을 정하는 방법과 트랜스포머의 인덕턴스를 결정하는 방법을 소개한다. 이들 램프 저항(R_L), 램프의 캐패시턴스(C), 그리고 트랜스포머의 인덕턴스(L)로 구성되는 회로를 이론적으로 분석하여 해를 구한다. 이들 해로부터 램프 시스템과 트랜스포머 간의 임피던스 매칭 특성을 조사한다. 그리고 실험 결과와 비교한다.

II. 회로 방정식과 해

Fig 1은 램프 시스템과 트랜스포머를 갖는 인버터로 구성된 회로도이다. EEFL시스템의 전기용량은 C 이다. 이때 EEFL의 양단 각각의 전기용량은 $2C$ 가 된다. 방전 램프의 저항은 R_L 이다.

본 연구의 실험 대상인 EEFL은 길이 738 mm이고 외경이 4 mm이며, 백라이트는 20 개의 EEFL을 병렬 연결하여 제작된 대각 길이 32인치의 LCD-TV용이다.

* [전자우편] gscho@kw.ac.kr

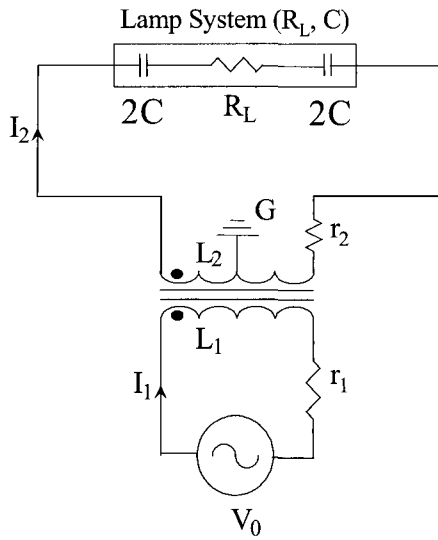


Fig 1. The schematic circuit of EEFL-lamp system and the transformer of the inverter.

트랜스포머의 1차측 및 2차측 코일의 인덕턴스는 각각 L_1 과 L_2 이며, 각 코일의 저항은 r_1 과 r_2 이다. 1차측의 입력 교류 전원은 $V(t)$ 이다. 1차측 회로와 2차측 회로에 흐르는 전류는 각각 I_1 및 I_2 이다.

Fig 1의 1차측 및 2차측의 회로 방정식은 각각 다음과 같다.

$$V = I_1 r_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + M \frac{dI_2}{dt} \quad (1)$$

$$0 = L_2 \frac{dI_2}{dt} + M \frac{dI_1}{dt} + I_2 (X_C + R_L + r_2) \quad (2)$$

위에서 상호 인덕턴스는 $M = k\sqrt{L_1 L_2}$ 이며, 결합 계수 (coupling coefficient)는 $k \leq 1$ 이다. 램프의 용량성 저항(capacitance reactance)과 자체 저항은 각각 X_C 와 R_L 이다.

식 (1)과 (2)에 $V(t) = V_0 e^{j\omega t}$, $I = I e^{j\omega t}$, $X_C = 1/j\omega C$ 를 대입하면, 각 회로의 전류 I_1 과 I_2 의 해는 다음과 같다.

$$I_1 = \frac{X_C + R_L + r_2 + j\omega L_2}{(r_1 + j\omega L_1)(X_C + R_L + r_2 + j\omega L_2) + \omega^2 M^2} V_0 \quad (3)$$

$$I_2 = \frac{-j\omega M}{(r_1 + j\omega L_1)(X_C + R_L + r_2 + j\omega L_2) + \omega^2 M^2} V_0 \quad (4)$$

그리고 램프 양단의 전압은,

$$V_2 = I_2 (X_C + R_L) \quad (5)$$

으로 주어진다.

회로 방정식의 해인 식 (4)와 (5)는 램프에 흐르는 전류 I_2 와 램프 전압 V_2 이며, 이들은 램프 및 트랜스포머의 변수들인 C, R_L, L_1, L_2 , 그리고 구동 주파수 ω 의 함수이다.

III. 램프 저항과 전기용량 그리고 트랜스포머의 인덕턴스

램프에 흐르는 전류와 전압의 해석 해를 분석하기 위하여 램프 및 트랜스포머의 변수들인 C, R_L, L_1 , 및 L_2 의 값을 알아야 한다. EEFL의 전기용량 C 는 Q-V 리사주 도형(Lissajous graph)에서 얻어진다 [10, 11]. 방전 램프의 저항 R_L 은 램프의 방전 전류와 램프 전압의 위상 차로부터 정해진다. 그리고 트랜스포머의 인덕턴스 값은 RLC 측정 장치를 이용하여 1차측과 2차측의 인덕턴스 및 상호 인덕턴스의 결합계수가 얻어진다.

Fig 2는 32인치용 EEFL 단일 램프와 20 개의 EEFL을 병렬 연결한 EEFL-BLU의 Q-V 리사주 도형이다. 전기용량 C 는 Q-V 도형에서 기울기로 결정된다. Fig 2와 같은 Q-V 그림에서 단일 램프의 전기용량 $C = 21.61$ pF이고, 20개의 병렬 연결된 EEFLs에서는 $C = 402.1$ pF으로 얻어진다. 여기서 20개의 병렬 연결 EEFL의 전기용량은 단일 램프의 약 20배이다.

방전 램프의 저항 R_L 은 램프 전류와 램프 전압의 위상 차로부터 얻어진다. Fig 3은 전류 및 전압의 오실로스코프 파형이다. 위상 차가 δ 이면, 위상 차는 전기용량 및 램프 저항과 $\tan \delta = -1/\omega C R_L$ 의 관계가 있다.

Fig 3의 전류 및 전압의 오실로스코프 신호에서, 전류와 전압의 위상 차 ($\Theta = 180 - \delta$)는 60.3° 이다. 따라서 단일램프에서 $C = 21.61$ pF이면, 저항은 $R_L = 66$ k Ω 으로 계산된다. 20-EEFLs BLU는 $C = 402.1$ pF이면, $R_L = 3.3$ k Ω 이며, 이는 단일램프의 1/20의 값이다.

인버터 트랜스포머의 1, 2차측 코일의 L 값 및 결합계수(Coupling Constant) k 를 LCR-Meter를 사용하여 측정한다. 트랜스포머의 L_2 값을 측정하고, 1차측을 연결한 트랜스포머의 L_2^{eff} 를 측정한다. 측정된 L_2 값 및 L_2^{eff} 값을 $L_2^{eff} = L_2(1 - k^2)$ 에 적용하여 코일의 결합계수 k 를 결정한다. 본 실험에서 사용하는 트랜스포머의 결합

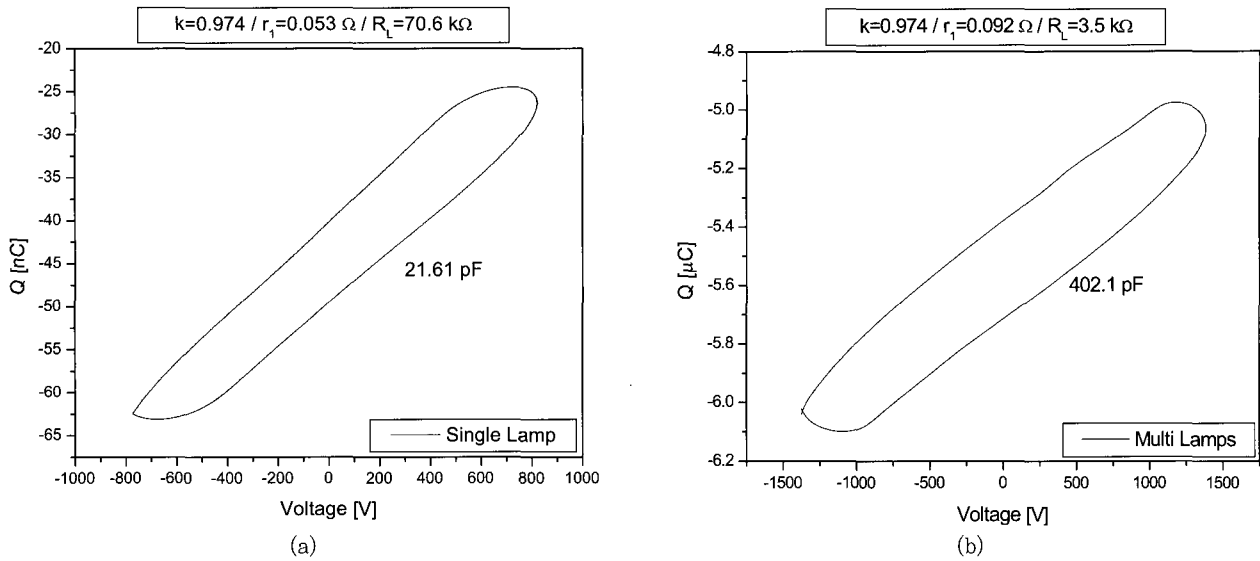


Fig 2. Lissajous graphs of Q-V for a single lamp in (a) and for multi-lamps of 20-EEFLs in (b).

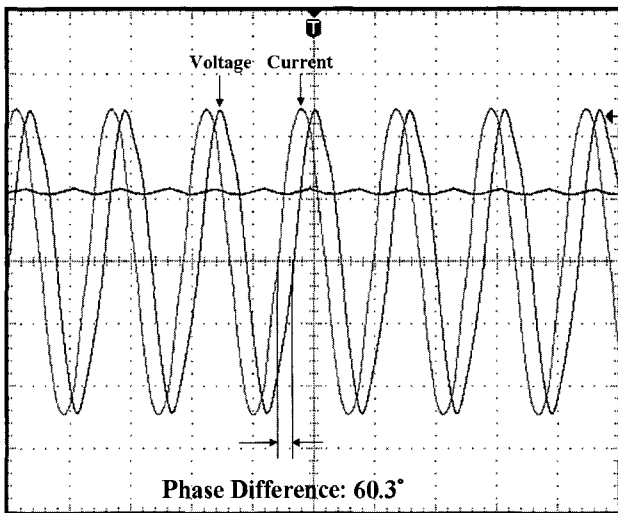


Fig 3. Phase difference between the current and voltage in a single lamp operation

계수 k 는 0.974 정도이다. 1차측의 결합계수 또한 2차

측과 같은 방법으로 측정하면 k 값은 0.974와 동일한 값을 얻는다. 단일램프에서 LC회로의 공명 주파수($\omega_r = 1/\sqrt{L_2 C}$)는 221 kHz이고, 매칭 주파수 ($\omega_M = 1/\sqrt{L_2 C(1-k^2)}$)는 976.5 kHz이다. BLU에서 공명 주파수는 11.3 kHz, 매칭 주파수는 49.9 kHz이다.

IV. 결과 및 토론

Fig 4와 5는 각각 단일램프와 32인치 BLU의 2차측 전류(식 (4)의 I_2)와 양단전압(식 (5)의 V_2)의 크기를 구동 주파수 비값(ω/ω_r)으로 나타내었다. 각각의 그림에서 실험결과를 solid square(■)로 나타내었다. 실험 데이터는 오실로스코프로 계측하여 I_{rms} 와 V_{rms} 로 얻어지며, $I_2 = \sqrt{2}I_{rms}$, $V_2 = \sqrt{2}V_{rms}$ 의 값으로 환산하여 표기하였다.

단일램프의 실험결과인 Fig 4에서, 구동 주파수 50~

Table. Parameters of EEFL-Lamp and transformer

	C [pF]	R_L [kΩ]	L_1 [mH]	L_2 [mH]	k	r_1 [Ω]	r_2 [Ω]	$\omega_r (f_r)$	$\omega_M (f_M)$
Single Lamp	21.61	66.0	0.03	24	0.974	0.053	36.5	1.39×10^6 (221 kHz)	6.14×10^6 (976.5 kHz)
32" BLU	402.1	3.3	0.6	493	0.974	0.092	68.92	71×10^3 (11.3 kHz)	3.14×10^5 (49.9 kHz)

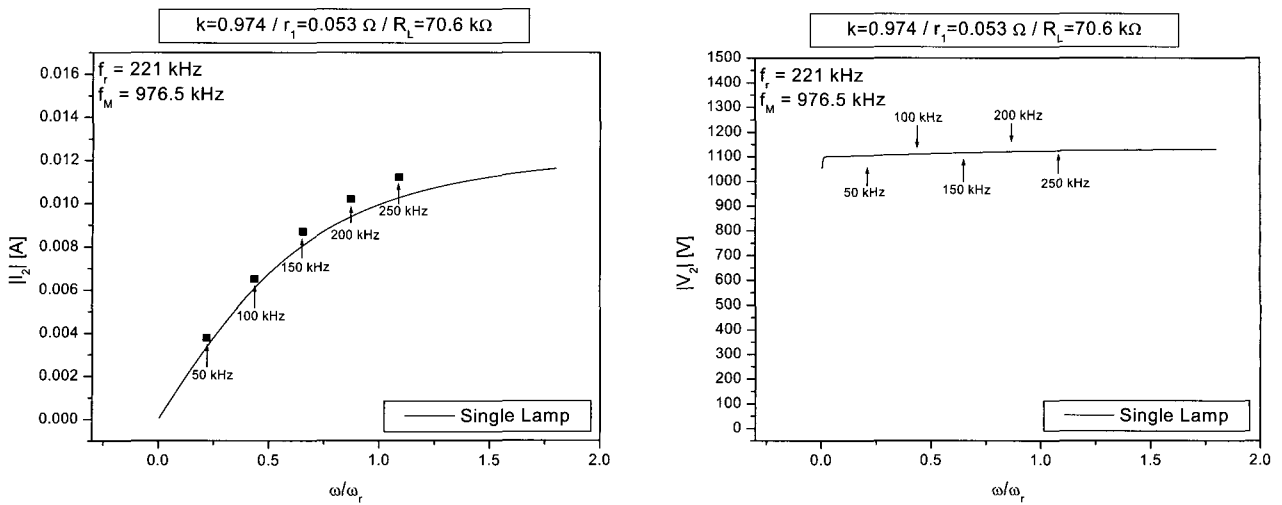


Fig 4. In the operation of a single lamp system, the lamp current I_2 in (a), and the lamp voltage V_2 in (b) with the operation frequency ω normalized with ω_r .

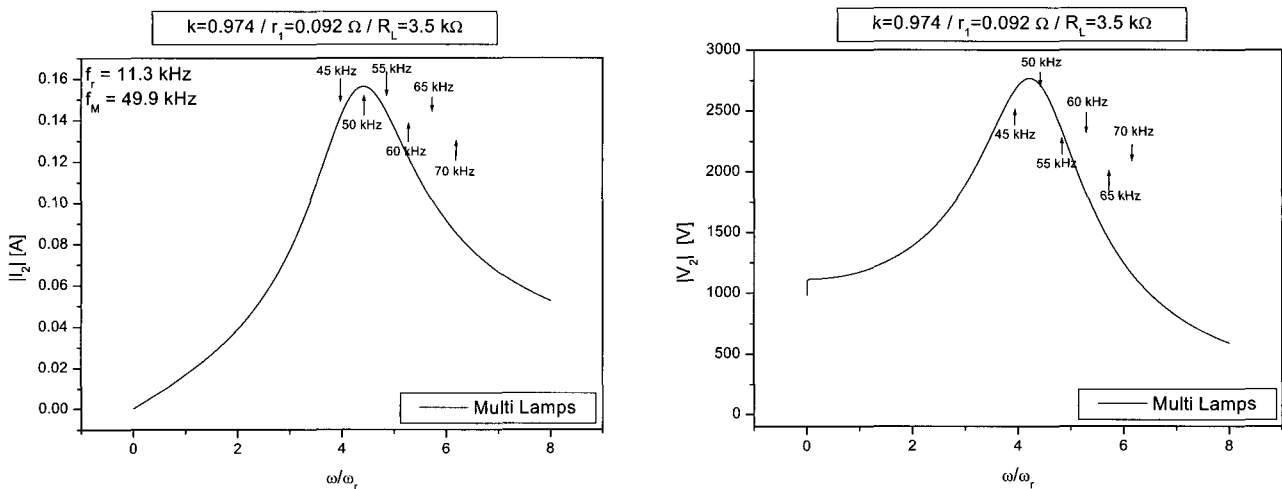


Fig 5. In the operation of 32"-BLU with 20-EEFLs, the lamp current I_2 in (a), and the lamp voltage V_2 in (b) with the operation frequency ω normalized with ω_r .

250 kHz의 영역에 대하여 램프 전류(I_2)는 3.8~11.2 (mA)로 선형적으로 증가하고, 램프 양단전압(V_2)은 1,094~1,144 V로 주파수 증가에 대하여 양단전압이 약간 증가하는 경향을 보인다. Table에서 단일 램프 구동 인버터의 매칭 주파수는 976.5 kHz이다. 따라서 매칭 주파수 보다 매우 작은 구동 주파수 50~250 kHz의 영역에 대하여는 주파수 증가에 따라서 램프 전류는 증가하며, 전압은 거의 일정한 값을 갖는다.

32인치 BLU에 대한 이론 해인 식 (4) 및 식 (5)의 결과와 실험결과를 Fig 5에 나타내었다. 특정한 값의 구동

주파수에서 전류 및 전압이 최대값을 갖는다. 이는 식 (4)와 식 (5)에서 매칭 주파수 ω_M 에서 전류와 전압이 최대 값을 갖는데, 이때 매칭 주파수는 49.9 kHz이다. 즉, 전류의 최대값은 $\omega/\omega_r \sim 4.41$ 일 때 $f_M \sim 49.9$ kHz이다. 한편 전압의 최대값은 $\omega/\omega_r \sim 4.22$ 일 때이며, 전류의 최대치의 주파수보다 약간 작은 값이다. 구동 주파수 45~70 kHz의 변화에 대하여, 50 kHz일 때 전류 (Fig 5(a))의 최대치인 155 mA($I_{rms} \sim 110$ mA)와 전압 (Fig 5(b))의 최대치는 2,620 V($V_{rms} \sim 1,852$ V)이다. 이때 BLU의 소모전력은 전류와 전압의 phase angle

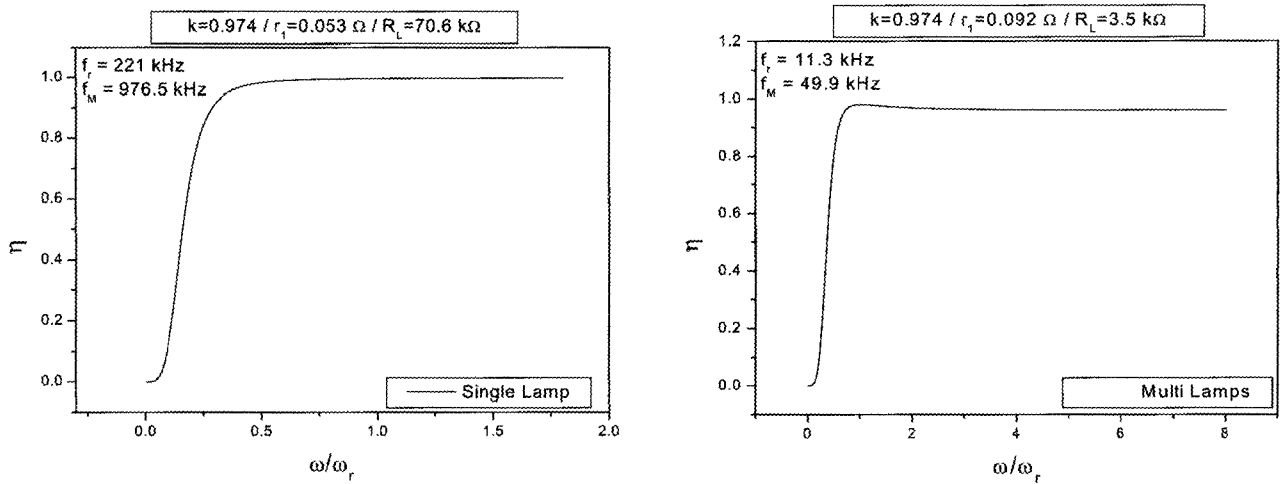


Fig 6. Inverting efficiency in a single lamp (a) and in multi-lamps (b)

60.3° 를 고려하여, 약 100 W이다. 주파수가 작거나 커지면 전류와 전압이 다소 작아진다. 주파수 65 kHz일 때, $I_2=140$ mA($I_{rms}\sim 99$ mA)와 $V_2=2,100$ V($V_{rms}\sim 1,485$ V)이고, 전류와 전압의 phase angle 62.2° 를 고려하여, 패널의 소모전력은 약 70 W이다.

본 논문은 위와 같은 실험결과를 앞 절에서 얻어진 해석 해를 통하여 확인하는 것이 주요 목적이다. Fig 4와 5의 실험값은 해석 해와 잘 일치함을 보여준다.

Fig 6은 인버팅 효율의 분석결과를 나타낸 것으로서 출력 전력과 일차측의 입력 전력의 비 값인 $\eta = W_{out}/W_{in}$ 를 주파수 비에 대하여 나타내었다. Fig 6(a)는 단일램프의 구동 결과이며, Fig 6(b)는 BLU의 구동이다. W_{in} 는 입력 전력, W_{out} 는 램프의 전력을 나타낸다. 이 실험에서 단일 램프는 250 kHz 이하로 구동하므로, $\omega/\omega_r < 1$ (여기서 $\omega_r = 1/\sqrt{L_1 C}$)의 영역이며, 이 영역에서의 인버팅 효율은 Fig 6(a)와 같이 1보다 상당히 작다. BLU의 실험에서 구동 주파수는 45~70 kHz이며, 이는 $\omega/\omega_r > 4$ 영역이므로 Fig 6(b)와 같이 인버팅 효율이 1에 근접한다.

V. 결론

EEFL의 구동 시의 램프 자체 저항 과 전기용량의 계측 방법을 제시하였다. 그리고 인버터를 구성하는 주요 부품인 트랜스포머의 1차 및 2차측 코일의 인덕턴스와 결합 상수를 계측하였다. 이들 EEFL의 저항(R_L)과 전기용량(C), 그리고 트랜스포머의 인덕턴스(L)로 구성된 회로 방정식으로부터 램프의 전류와 전압의 해를 구하였

다. 그리고 이들의 해들은 EEFL의 단일 램프와 20개의 EEFL을 병렬 연결한 백라이트 구동의 실험결과와 잘 일치한다.

32인치용 EEFL 단일램프의 저항과 전기용량은 각각 66 kΩ 및 21.61 pF이고, 20 개의 램프를 병렬 연결한 백라이트는 3.3 kΩ 및 402.1 pF이다. 이는 20 개의 병렬 연결 램프의 저항은 단일 램프 저항의 1/20, 백라이트 전기용량은 단일 램프의 전기용량의 20 배와 거의 일치한다. 램프의 구동에서 전류 및 전압의 최대값을 나타내는 임피던스 매칭 주파수는 $\omega_m = 1/\sqrt{L_1 C(1-k^2)}$ 로 정해진다. 임피던스 매칭을 위하여 램프 시스템의 저항과 전기용량이 정해지고, 구동 주파수가 정해지면, 인버터의 트랜스포머의 인덕턴스가 결정된다. 이때 1차 코일과 2차 코일의 결합 상수도 중요 변수의 하나이다. 이 연구는 EEFL 구동용 인버터를 설계하기 위한 기본 방향을 제시하고 있다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 광운대학교 교내연구비로 연구되었습니다.

References

[1] J. J Thomson, Philosophical Magazine, 32, pp. 32-445; N. Tesla, Electrical Engineer, 7, 549 (1891).

- [2] G. I. Babat, J. IEE, **94**, 27 (1947).
- [3] T. Shiga, K. Hashimoto, Y. Baba, S. Mikoshiba, S. Takaku, S. Nishiyama, The Sixth Asian Symposium on Information Display & Exhibition Proceedings, ASID'00, Xi'an, P. R. China, Oct. 19-21, pp. 165-169 (2000).
- [4] Y. Baba, M. Izuka, T. Shiga, S. Mikoshiba, and S. Nishiyama, SID'01, Vol. 32, pp. 290-293 (2001).
- [5] H. S. Kim, et al., SID'01 Digest, pp. 687-689 (2001).
- [6] S. J. Kim, et al., SID'02 Digest, p. 1151 (2002).
- [7] G. Cho, et al., SID'03 Digest, p. 1368 (2003).
- [8] B. S. Lee, et al., SID'03 Digest, p. 1372 (2003).
- [9] D. H. Lee, et al., SID'04 Digest, p. 1335 (2004).
- [10] T. S. Cho, et al., Japan. J. Appl. Phys. **41**, L335 (2002).
- [11] T. S. Cho, et al., Japan. J. Appl. Phys. **41**, 7518 (2002).
- [12] T. S. Cho, et al., IEEE, 30, No. 5, p 2005 (2002).
- [13] G. S. Cho, et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **36**, p 2526 (2003).
- [14] G. S. Cho, et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **37**, p 2863 (2003).

Analysis of Inverter Circuit with External Electrode Fluorescent Lamps for LCD Backlight

Jong-Mun Jeong, Myeong-Ju Shin, Mi-Ran Lee, Ga-Eul Kim, Jung-Hyun Kim, Sang-Jin Kim, Min-Kyu Lee, Mi-Jo Kang, Sang-Cho Shin, Sang-Hyun Ahn, Do-Hyun Gill, Dong-Gun Yoo, Je-Huan Koo, June-Gill Kang, Eun-Ha Choi, and Guangsup Cho*

Department of Electrophysics, Kwangwoon University, Seoul 139-701

(Received October 27, 2006)

The circuit of the EEFL system and the inverter has been analyzed into the resistance R_L , the capacitance C of the EEFL-backlight system, and the inductance of transformer in the inverter. The lamp resistance and capacitance are determined from the phase difference is between the lamp current and voltage and from the Q - V diagram, respectively. The single Lamp of EEFL for 32" LCD-BLU has the resistance of 66 k Ω and the capacitance of 21.61 pF. The resistance, which is connected by parallel in the 20-EEFLs BLU, is 3.3 k Ω and the capacitance is 402.1 pF. The matching frequency in the operation of lamp system is noted as $\omega_M = 1/\sqrt{L_2 C(1-k^2)}$, where L_2 is the inductance of secondary coil and k is the coupling coefficient between primary and secondary coil. The lamp current and voltage has maximum value at the matching frequency in the LCD BLU system. The results of analytic solutions are in good agreement with the experimental results.

Keywords : EEFL(External Electrode Fluorescent Lamp), Backlight, Inverter, Impedance matching, Transformer

*[E-mail] gscho@kw.ac.kr