

무전극 형광램프의 주파수에 따른 임피던스 및 Q-factor 변화 연구

백광현, 양종경, 이종찬, 최용성, 박대희
원광대학교

Impedance and Q-factor of frequency dependance according to ferrites on electrodeless fluorescent lamp

Gwang-Hyoen Pack, Jong-kyung Yang, Jong-Chan Lee, Yong-Sung Choi, Dae-Hee Park
Wonkwang University

Abstract - An electric power efficiency of electrodeless fluorescent lamp has big relative property of gas in lamp, gas pressure, lamp formation, ingredients of magnetic substance and shape and action frequency etc. We used magnetic substance that open self-examination material of electrodeless fluorescent lamp antenna. Ferrite that is used in this experiment was Mn-Zn type. We have examined resistance kind, impedance, Q-factor's frequency characteristic by ferrite. Impedance, resistance and capacitance did not show difference in start frequency 2.65 [MHz] but there was difference quantity. We could know Q-factor's difference according to material, and Q-factor's is important part of antenna design.

2. 시료 및 실험 방법

2.1 시료

무전극 형광램프 안테나의 자성재료는 연자성체가 주로 이용되고 있다. 대표적 연자성체에는 Mn-Zn와 Ni-Zn형이 있으며 일반적 MHz 대역에서는 Mn-Zn형의 페라이트를 주로 이용하며, 고주파에서는 Ni-Zn형의 페라이트를 이용한다. 따라서 본 실험에서 사용된 페라이트도 Mn-Zn형의 페라이트를 사용하였다5).

실험 재료는 T사의 페라이트 (PE22) 1종류와 F사의 페라이트 2종류 (3F4, 3F45)를 사용하였고, 국내산 제품으로는 S사의 페라이트 (SM8T)를 사용하였다. 표 1은 재료별 기본 물성 및 자성을 나타내고 있다. 각 재료마다 투자율, 밀도 등의 물성이 조금씩 다르다는 것을 알 수 있다.

1. 서 론

무전극 램프의 방전현상은 1884년 Hittrof에 의해서 처음으로 발견되었고, 1891년 Nikola Tesla는 비교적 낮은 용량 결합형 RF주파수에 의한 방전 램프를 소개하였다. 1907년 P. C. Hewitt에 의해 오늘날의 플라즈마 반응으로의 원리인 ICP (Inductively Coupled Plasma)를 발견하였고, Bethenod와 Claude에 의하여 페라이트 코어를 적용한 ICP가 소개 되었다. 그 후, 1970년대 Anderson에 의해서 유도결합형 램프의 원리가 비로소 정착되었다2),3). 무전극 형광램프는 1978년도에 개발되었으며 상용화는 필립스사의 QL Lamp의 시작으로부터 GE사의 General lamp 및 오스람사의 Endura lamp 등 여러 선진국의 업체들에 의해서 점차 고출력 및 고효율이 이루어지고 있다. 이러한 무전극 형광램프의 우수성이 알려지면서 많은 국가들이 무전극 형광램프에 효율 및 성능개선에 많은 연구를 하고 있다.

무전극 형광램프의 전력 효율은 램프 내의 가스 종류, 가스 압력, 램프 형성, 자성체 재료 및 형상 그리고 동작 주파수 등에 큰 의존성을 가진다. 특히, 제한된 주파수에 그의 효율 향상을 위해서는 램프의 구조설계 분야도 큰 비중을 차지한다. 또 고주파 에너지를 공급하는 장치는 중앙부에 발생하는 공진 주파수를 전자기장을 이용하여 에너지를 공급하는 데, 이때의 전기적인 변환 결합은 대단히 중요하며, 지금까지 이를 위한 많은 특허와 기술보고가 있으나 실용적으로 많은 해결해야 할 문제점들이 많다.

본 논문은 이러한 무전극 형광램프의 성능 및 효율을 향상시키기 위하여, 무전극 형광램프의 페라이트의 임피던스, 저항, 커패시턴스 및 Q-Factor의 주파수 의존성을 실험하였다.

표 1. 각 페라이트 코어의 기본조건

Model	Size	Length [mm]	Density [kg/s]	μ_r 150[°]	P_v [kW/s]
PE22	O.D(φ)18	60	≈4,750	≈1,350	≤350
	I.D(φ)11				
3F4	O.D(φ)17	59	≈4,700	≈1,250	≤320
	I.D(φ)11				
3F45	O.D(φ)17	55	≈4,800	≈1,400	≤700
	I.D(φ)11				
SM8T	O.D(φ)18	59	≈4,700	≈1,350	≤659
	I.D(φ)11				

페라이트 코어에 교류 자장을 인가하면서 주파수를 높여 가면 여러 가지 원인에 의해 유도자장 B는 인가된 교류 자장 II를 따라가지 못하고 손실각 δ만큼의 위상이 지연된다. 이러한 위상 지연은 페라이트 코어내의 에너지 손실로 표현될 수 있으며, 투자율은 다음과 같은 함수로서 나타 낼 수 있다.

$$\mu = \frac{B}{H} = \mu' - j\mu''$$

저주파 대역에서는 위상지연이 거의 일어나지 않아 투자율 $\mu = \mu'$ 가 되지만 고주파에서는 손실각δ가 커지면서 에너지 손실을 의미하는 μ'' 가 증가 한다6).

2.2 무전극 형광램프의 등가회로

그림 1은 무전극 램프의 등가회로를 구현한 것이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 유도결합형 플라즈마의 2차 축을 권선수가 1인 공심코일로 가정하여, 이러한 유도결

합회로의 이론을 그대로 적용하여 2차측 방전관의 파라미터와 1차측 유도코일과의 상관관계에 대한 연구가 진행되어 왔다.

방전관의 형태와 크기 그리고 1차측 유도코일 일부와의 상호 관계에 따라 상호인덕턴스, 결합계수의 값이 변하게 되고 1차측의 인덕턴스 및 임피던스 및 임피던스에 영향을 준다.

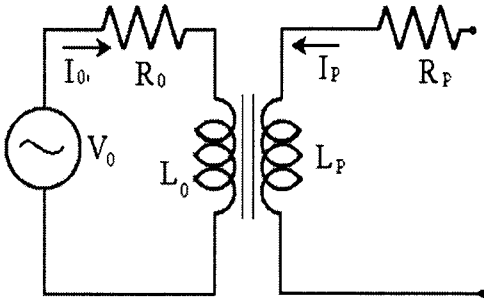


그림 1. 무전극 램프의 동가회로
Fig 1. Equivalent circuit of electrodeless lamp

$$V_0 = I_0 R_0 + i\omega L_0 I_0 + i\omega M I_P \quad (1)$$

$$0 = I_P R_P + i\omega L_P I_P + i\omega M I_0 \quad (2)$$

식 (2)로부터

$$0 = (R_P + j\omega L_P) I_P + j\omega M I_0$$

$$\therefore I_P = -\frac{j\omega M}{R_P + j\omega L_P} I_0$$

따라서 전류는 I_0 는 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$V_0 = (R_0 + j\omega L_0 + \frac{\omega^2 M^2}{R_P + j\omega L_P}) I_0$$

$$\therefore I_0 = \frac{1}{(R_0 + j\omega L_0 + \frac{\omega^2 M^2}{R_P + j\omega L_P})} V_0 \quad (3)$$

$(\omega L_P)^2 \gg R_P^2$ 을 이용하여 식 (3)에서 1차측의 임피던스 성분을 전개하면,

$$\therefore Z_0 = (R_0 + \frac{M^2 R_P}{L_P^2}) + j\omega(L_0 - \frac{M^2}{L_P}) \quad (4)$$

과 같이 된다.

위식으로 1차측과 2차측 코일의 주파수 특성을 계산할 수 있다.

2.3. 실험 방법

본 실험은 페라이트의 임피던스 및 Q-Factor 의존성을 측정하는 것이다. 1차측의 임피던스와 Q-Factor를 측정하기 위하여 Impedance/Gain-Phase analyzer인 HP4194A를 이용하여 각각의 파라미터를 측정하였다. 그림 2는 실험한 무전극 램프와 안테나 및 페라이트를 나타낸 그림이다. 그림 2 (b)의 시료들을 구리망 안에서 측정하여 외부로부터의 간섭을 최소화하였다. 측정은 상온(25°C)에서 측정하였다. Sleeve의 권선수를 변화시킴에 따

라 파라미터가 변경하게 되는데 그에 따라 휘도가 얼마나 변화되는지 임피던스의 변화를 알아보았다.

먼저 기존제품의 안테나와의 특성 분석을 위해 650[kHz]~16[MHz] 까지 주파수를 변화시켜가며 각각의 안테나에 대한 자기공진주파수 대역을 확인하고, 주파수를 동작주파수 대역으로 범위를 좁힌 후 각각의 안테나에 대한 임피던스 Z, 인덕턴스 L, 저항 R, 리액턴스 X, 커패시턴스 C, 그리고 Q-factor를 살펴보았다.

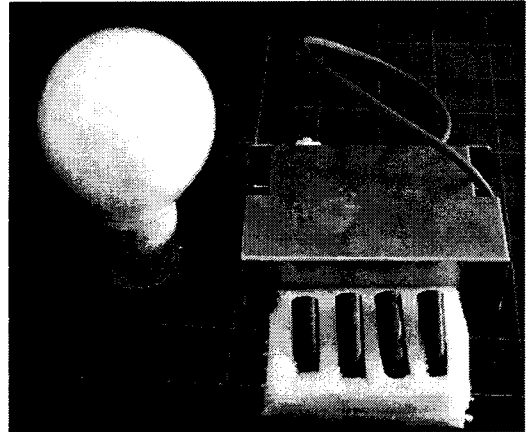


그림 2. 실험용 무전극 램프와 시료(페라이트)
Fig 2. The electrodeless lamp and antenna

3. 결과 및 고찰

유도결합의 원리에 의해서 에너지 전달이 이루어지는 무전극 형광램프에서 1차측 유도코일의 무부하 특성이 매우 중요하다. 램프가 발광이 된 후에는 램프내부의 부하 특성이 다시 1차측 유도코일에 영향을 주어 코일의 임피던스 및 인덕턴스 성분을 변화시키고 전원장치에서 공급되는 전력의 변화를 야기한다. 결국 최대 전력전송을 위한 임피던스 매칭이 변화하게 되어 램프의 점등이 어렵게 된다. 따라서 주어진 램프의 형상과 봉입가스의 종류 및 압력에 대한 2차측의 부성저항특성인 플라즈마 임피던스와 플라즈마 인덕턴스특성의 분석은 매우 중요하다. 또한 램프의 점등이 이루어지면서 램프 내부의 온도가 상승하게 되고 내부 코어재의 온도 특성이 변하면서 자성특성 역시 변화하게 되고, 결국 1차측 유도코일 특성이 변하게 되므로 이러한 특성을 직접 측정을 통하여 분석하기는 매우 어려운 실정이다.

하지만 본 논문에서 언급한 무전극 형광램프의 플라즈마 특성은 유도결합회로를 이용하여 동가회로로 나타낼 수가 있었고, 계산을 통해 대략적인 수치를 알 수가 있었다.

그림 3은 주파수와 임피던스와의 관계를 나타낸 그래프이다. 그림 3에서와 같이 임피던스는 6[MHz]에서 7.5 [MHz] 사이에서 높은 값을 갖는다. F사의 3F45가 13000 [Ω] 정도로 가장 큰 값을 보였고 T사의 PE22가 5000 [Ω]로 가장 작은 값을 보였다. 그러나 사용주파수인 2.65 [MHz]에서는 매우 낮은 임피던스 특성을 보였다. 각각의 시료를 비교해 볼 때 2.65 [MHz]에서는 큰 차이 없음을 보였다. 그러나 F사의 3F45가 0 [MHz]~6.5 [MHz]까지 가장 낮은 임피던스를 보이고 있다. 따라서 저주파에서 F사의 3F45가 가장 우수한 특성을 보였다.

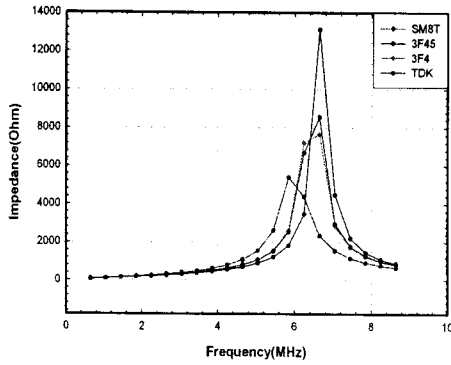


그림 3. 주파수와 임피던스와의 관계
Fig 3 RelationwithFrequency and Impedance

그림 4는 주파수와 저항의 관계를 나타내는 그래프이다. 그림 4에서 보는바와 같이 0 [MHz] ~ 4 [MHz]에서는 0 [Ω]로 나타났다. 4 [MHz] 이상부터는 급격한 증가를 나타내는 주파수 특성을 보였다. 이와 같이 주파수가 증가함에 따라서 저항도 증가하는 이유는 표피효과 때문이다. 그림 4에서도 마찬가지로 F사의 3F45가 주파수 약 7 [MHz]에서 12000 [Ω]로 가장 높은 수치를 보였으며, F사의 3F4가 동일 주파수에서 가장 낮은 값 3900 [Ω]를 보였다. 램프의 동작 주파수 2.65 [MHz]에서는 0 [Ω]으로 모든 시료가 같은 값을 나타냈다. 그림 4에서도 그림 3과 마찬가지로 임피던스와 저항은 0 [MHz]~6.5 [MHz]까지에서 F사의 3F45가 가장 낮은 주파수 특성을 보이고 있다. 그림 3과 4로 보아 F사의 3F45가 가장 우수한 주파수 특성을 보인다. 반면 S사의 SM8T는 그림 3과 4에서 저주파에서 큰 저항 값을 보이고 있다. 따라서 가장 낮은 저항 값을 보이는 F사의 3F45보다 안테나의 제작으로는 부적합한 것으로 사료 된다. 가장 적합한 시료는 F사의 3F45가 우수한 성능으로 가장 좋은 주파수 특성을 갖고 있다.

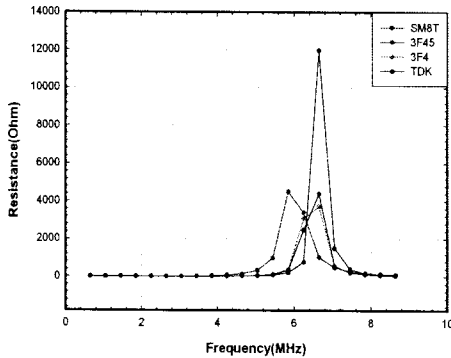


그림 4. 주파수와 저항의 관계
Fig 4 RelationwithFrequency and Resistance

그림 5는 커패시턴스의 주파수 특성을 나타내는 결과이다. 커패시턴스는 각각의 시료가 주파수 약 1.8 [MHz]~2.5 [MHz]에서 급격히 증가하는 특성을 보였고, 4 [MHz]이상부터는 증가하지 않았다. 램프의 동작주파수 2.65 [MHz]에서 약 -150 [pF]의 값으로 측정되었다. 각 시료마다 조금씩 차이를 보였으나 F사의 3F45가 가장 낮은 주파수 특성을 보였다. 반면 S사의 SM8T가 가장 큰 값을 나타내고 있었다.

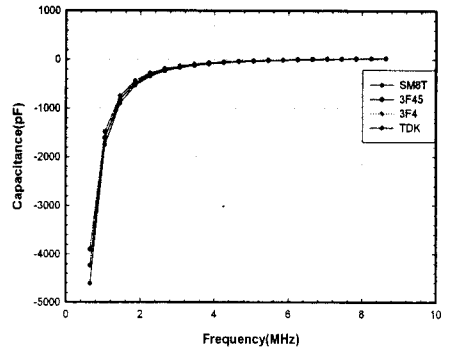


그림 5. 주파수와 커패시턴스와의 관계
Fig 5 RelationwithFrequency and capacitance

그림 6은 인덕턴스의 주파수 특성을 나타내는 그림으로 5 [MHz] ~ 8 [MHz]에서 급격한 변화를 보였다. S사의 SM8T는 6 [MHz]까지 증가를 하다가 6 [MHz] 이상되는 주파수에서는 급격한 감소를 보이고 6.5 [MHz]이상에서 다시 증가하는 주파수 특성을 보였다. F사의 3F4와 T사의 PE22는 거의 같은 주파수 특성으로 약 6.5 [MHz]까지 증가하는 특성을 보이고 6.5 [MHz] 이상 되는 주파수에서 급격히 감소하는 특성을 보였고, 약 6.8 [MHz] 이상에서 다시 증가하는 것을 알 수 있었다. F사의 3F45는 6.8 [MHz]까지 인덕턴스가 증가하고 6.8 [MHz]에서부터 감소하다 약 7 [MHz] 이상에서 임피던스가 다시 증가하였다. 램프의 동작 주파수 2.65 [MHz]에서는 15~21 [μH]로 매우 안정적인 주파수 특성을 보인다. 그림 6에서 F사의 3F45가 저주파수에서 가장 낮은 특성을 보인다. 이는 자계의 강도가 낮은 것을 의미 한다. 반면 S사의 SM8T는 가장 큰 값을 가지고 있다. 그러나 앞에서 설명한 바와 같이 6 [MHz]까지만 증가하는 주파수특성을 보이나 그 값은 매우 작다. 반면 F사와 T사의 시료는 6 [MHz] 이상의 주파수에서 증가하고 그 값이 매우 큰 것을 알 수 있다.

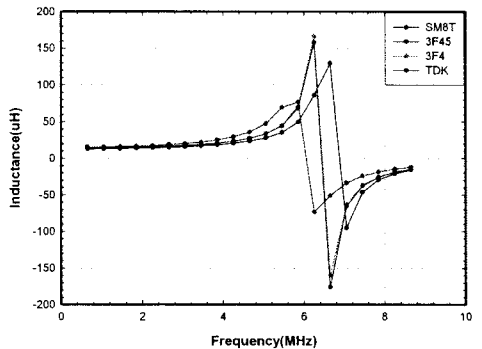


그림 6. 주파수와 인덕턴스와의 관계
Fig 6 RelationwithFrequency and inductance

Q-factor 는 $Q = \frac{\omega L}{R}$ 로 표현되며 주파수와 인덕턴스에 비례하여 증가하지만 주파수가 증가하게 되면 저항성분도 급격히 증가하므로 Q-factor가 감소되는 이유는 다음과 같은 복합적인 요인에 의해서 발생한다. 코일 자체의 성분에 의한 동손, 히스테리시스 곡선에 의한 철손, 그리고 과전류손이다. 주파수가 올라가면 전선에 대한 표피 효과나 페라이트 코어에

대한 히스테리시스손과 과전류 손이 증가를 하며 또한 코일의 감은 방법에 의해 달라지는 부유용량도 영향을 미친다.

그림 7은 Q-factor의 주파수 특성을 나타낸 그래프이다. 0 [MHz] ~ 2 [MHz]까지는 Q-factor가 증가하는 결과를 보이지만 2 [MHz]부터는 감소하여 6.5 [MHz] 부근에서는 0으로 감소하다, 다시 증가하는 경향을 보인다. 램프의 동작 주파수인 2.65 [MHz]에서는 모두 감소하는 것을 알 수 있으나 S사의 SM8T가 가장 많은 감소량을 보였다. S사의 SM8T는 1.75 [MHz]에서 감소가 시작되어는 반면 다른 시료들 F사의 3F45와 3F4, T사의 PE22는 2 [MHz]에서부터 감소하는 주파수 특성을 나타내었다. 램프의 동작 주파수 2.65 [MHz]에서 F사의 3F45와 3F4는 95로 같은 값을 나타냈고, T사의 PE22는 F사의 시료보다 조금 높은 105로 나타났다.

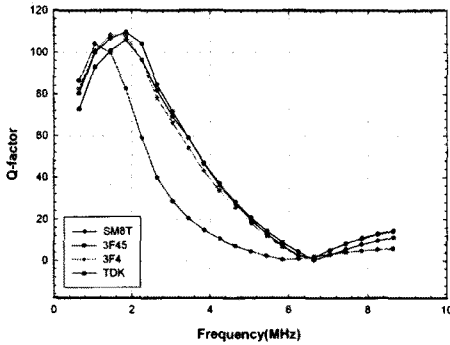


그림 7. 주파수와 Q-factor와의 관계
Fig 7 Relation with Frequency and Q-factor

4. 결 론

본 논문은 무전극 형광램프의 안테나의 자속밀도를 변화시키기에 따라 임피던스 및 Q-factor의 주파수 의존성을 측정하였고, 각각의 시료의 주파수 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시료에 따라 안테나의 주파수 특성은 Q-factor의 향상으로 시료선택이 중요하다는 것을 알 수 있었다.
- 2) 안테나의 설계에 있어서 시료의 주파수 특성으로 인해 램프의 임피던스 매칭과의 관계를 알 수 있었다.
- 3) 동작 주파수인 2.65 [MHz]에서의 Q-factor는 매우 중요하므로 SM8T의 주파수 특성보다는 F사와 T사의 시료가 우수한 것으로 나타났다.
- 4) 종합적으로 주파수 특성을 살펴보았을 때 F사의 3F45가 안테나 제작에 가장 우수한 주파수 특성을 보이는 것을 사료된다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성 지원 사업(I-2004-0-074-0-00)에 의해 작성되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Brian Cook, "New developments and future trends in high-efficiency lighting", Engineering Science and Education Journal, Vol. 9, pp. 207-217, 2000.
- [2] D. O. Wharmby, "Electrodeless lamps for lighting: a review", Science Measurement and Technology, IEE Proceedings A, Vol. 140, pp. 465-473, 1993.
- [3] V. A. Godyak, Ohata, "Radio Frequency Light Sources", Industry Application Conference, Conference Record of the 2002 IEEE, Vol. 5, pp.3281-3288, 2000.
- [4] H. Kido, H. Makimura, S. Masumoto, "A study on electronic ballast for electro ballast for electrodeless fluorescent lamp with dimming capabilities", 36th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE, Vol. 2, pp.889-894, 2001.
- [5] H. Y. Lee, H. S. Kim, J. S. Huh, Y. W. Oh, "The Electromagnetic and Thermal Properties of the Mn-Zn Ferrite for the Power Line Communication", KIEE International Transactions on EA, Vol.2-C, pp. 220-224, 2002.
- [6] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, Power electronics: Converters, Application and Design, Chapter 7, John Wiley & Sons, 1989.