

## The Power Rating Design of Inductively Coupled Plasma Light Source and The Electrical Dependency Between Parameters

金賢鎰\* · 林涓贊† · 朴大熙\*\* · 張洪淳\*\*\* · 白壽鉉§

(Hyun-Il Kim · Youn-Chan Yim · Dae-Hee Park · Hong-Soon Chang · Soo-Hyun Baek)

**Abstract** - We studied on the dependency of parameters which those were used to design a ballast of ICP light source. These parameters were derived from Barkhausen criterion equation about the oscillating condition of ballast. Comparing with a change of turns, we can suggest that a change of  $l$  is suitable to control a  $I_p$  of an ICP light source. According to the  $Z-l$  equation, we can find an optimum rating power of ICP light sources corresponding to  $l$ .

**Key Words** :Barkhausen criterion, Rating power, Inductively coupled plasma, Impedance, Design of ICP light source

### 1. 서 론

대부분의 인위적인 빛은 다음의 3과정을 통해서 발생된다 [1-4]. 즉 백열등과 같이 고온체의 복사를 이용하는 경우, 원자나 분자로부터 발광을 얻는 기체방전 그리고 자외선을 이용한 가시광 광변환 등이 이에 해당된다. 기체방전의 경우 기저상태에 존재하는 전자에 특정한 에너지를 공급하게 되면 이로부터 빛이 발광된다. 이때 기저상태의 전자에 특정 에너지를 공급하는 과정에 따라서 Cold Cathode Fluorescent Lamp(CCFL), hot Cathode lamp, Inductively Coupled Plasma lamp (ICP)등의 여러 광원으로 구분되어진다. 1880년대 에디슨에 의해서 처음으로 백열등이 개발되면서 당시 광원의 기능은 단순 조명으로만 이용되었지만 1960 년대에 수은을 이용한 형광등이 개발되면서 고효율, 고발광의 기술적 연구가 시작되었다. 이러한 흐름은 최근까지 이어져 왔으나 21세기에 접어들면서 정보화 사회는 인류의 탄소 에너지 고갈에 대한 위기의식 고취와 함께 인간적인 면을 중시하는 기술 개발에 대한 중요도를 더욱 부각하게 되었다. 시대적 패러다임의 변화는 광원의 기술 개발에 괄목할만한 전환점을 부여하게 되었다. 이로 인하여 광원은 종래의 형광등이 갖고 있던 기능을 넘어서 인간과 환경을 고려함으로써 새로운 기능 확대를 이루기 위한 노력이 집중되고 있다.

최근 이와 같은 기술 동향에 잘 부합되는 기체방전 광원으로서 ICP광원은 형광광원을 대체할 수 있는 미래형 광원

으로 발전하기 위한 연구가 보고되고 있다[5]. 형광광원은 253 nm의 진공자외선(VUV)을 방출하는 수은에서의 방사와 이를 이용한 광변환 과정을 도입함으로써 전 세계적으로 가장 폭넓게 이용되고 있는 제품이다. 그러나 Tokyo Protocol의 체결과 청정개발체제가 수립됨으로써 인체에 유해한 물질을 사용한 제품 생산이 제한되면서 수은발광에 의한 고효율 구현이 사실상 어렵게 되었다.

수은을 대체하기 위한 연구가 요구되는 시점에서 아말감을 이용한 광변환 효율이나 혼합가스를 이용한 발광효율 등은 좋은 연구결과라 평가되고 있다[5]. 그러나 수은 발광을 이용한 형광광원의 성능에 이르기에는 보다 많은 연구가 요구되고 있다[6,7]. 이에 반해 ICP 광원의 경우는 아말감과 혼합가스 등의 개선된 방법을 이용하여 광원의 성능을 향상 시킬과 동시에 외부전극의 구조를 채택함으로써 광원의 수명 향상을 현저하게 높인 형태이다. 이러한 특성은 에너지 절감이 가능한 기술로 평가되면서 근래까지 국내의 산업이 다국적 기업 주도로 형성되었었으나 최근 국내 기업에서도 75 W, 100 W, 150 W, 200 W급이 판매되고 있다. 연구개발을 통해 실용화가 이루어진 기술에 대해서는 명확한 특성 분석과 해석이 바탕이 되어 제품의 질적 향상에 이바지 되어야 한다. 그러나 ICP 광원에 대해 광원의 특성을 이해하고 개발기술의 신뢰성을 높이기 위해서는 보다 많은 특성 분석에 관한 연구가 요구되고 있다. 게다가 현재 ICP 광원의 경우 국내외적으로 기술의 표준화 요구가 이루어져야 할 부분들이 많이 남아 있기 때문에 ICP 광원 개발 기술의 표준화를 위한 기초 연구가 절실히 필요하다. ICP 광원의 경우 페라이트 코어의 특성 변화가 광원의 성능에 큰 영향을 주는데 이러한 주된 요인으로는 페라이트 코어의 온도에 대한 의존성에서 기인된다[4]. 이러한 온도특성은 광원을 구동하기 위해 인가되는 전류 그리고 광원 내부에 흐르는 전류에 의해서 기인된다. 따라서 온도 변화에 따른 광원의 특성 변화에 대한 해석은 광원의 설계 조건과 부합하여 해석되어질 필요가 있다. CCFL의 경우 발광효율을 향상시키기 위해

\* 正 會 員 : 東國大學 電氣工學科 博士課程  
 \*\* 正 會 員 : 圓光大學 電氣電子및精報工學部 教授  
 \*\*\* 正 會 員 : 韓國産業技術大學 知識基盤技術·에너지大學員 教授  
 § 正 會 員 : 東國大學 電氣工學科 教授  
 † 교신저자, 正會員 : 圓光大學 電子材料工學科 理博  
 E-mail : caea-yyc@wonkwang.ac.kr  
 接受日字 : 2007年 12月 26日  
 最終完了 : 2008年 1月 18日

서는 양광주 발광영역을 늘리기 위한 것으로 방전관을 얇고 길게 제작하여야 한다고 보고되고 있다[1,2]. 이러한 연구 결과는 방전관의 길이에 대한 전류 변화를 제시하고 있다. 그러나 ICP 광원에서는 이와 같은 연구 결과가 현재까지 보고된 바가 없다. 이 같은 사실은 최적의 방전관 길이에 대해서 ICP 광원의 설계가 이루어졌는지 판단의 근거나 지표가 부족하다는 것으로 판단된다.

따라서 본 연구는 안정기 발진조건식을 통해서 얻어지는 인자(parameter)들간의 상관관계가 ICP 광원 설계에 있어서 전기적 특성에 기여되는지 확인하였다.

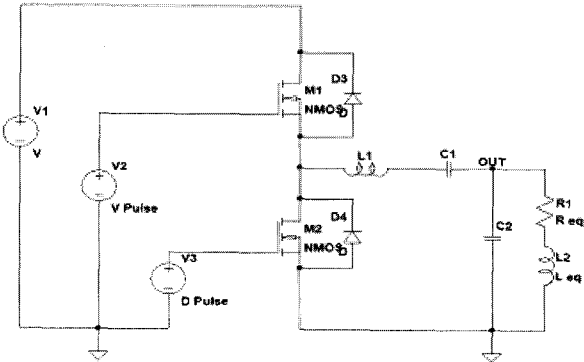


그림 1 하프브리지 방식의 인버터 구조  
Fig. 1 Structure of a Inverter typed with Half Bridge

이러한 결과를 토대로 방전관의 길이에 따른 광원의 전기적 특성을 비교하여 보았다.

## 2. 관련 이론

### 2.1. 안정기의 발진 조건

트랜스포머의 원리를 이용하여 전기회로적으로 해석되어지는 ICP 광원을 구동하기 위해서 안정기는 고주파의 동작이 가능해야 한다. 이 같은 사실이 가능하기 위해서는 기존의 자화트랜스를 사용한 자력식 발진 인버터와는 다른 설계가 요구되어진다. 따라서 본 연구에서는 하프브리지(Half Bridge) 구조의 Class-D 형태를 도입하였다[8-10].

그림 1에 하프브리지 방식의 인버터 구조를 나타내었고 발진을 위하여 인덕터의 전류가 게이트구동신호로 피드백(feedback)될 수 있는 구조이다.

안정기의 발진은 Barkhausen 이론에 의해 피드백 시스템은 단일 루프 게인을 이루어야 하고 다음 (1)과 같은 조건을 만족해야만 한다.

$$G(s) H(s) I(s)_{s=j\omega} = 1 < 2k\pi \quad \text{식 (1)}$$

여기에서 G(s)는 공진회로부, H(s)는 게이트 구동부 그리고 I(S)는 인버터 스위치회로를 나타내고 k는 상수값이다.

이와 같은 조건을 만족할 경우 출력신호는 해당주파수대역에서 위상차가 0°인 필터를 통해 비반전 입력에 연결되거나 또는 180°의 위상차 필터에 대해서 반전입력(inverting input)부로 입력된다.

Barkhausen criterion이 성립하기 위해서는 출력된 필터의 인덕터 전류와 인버터 전압 간 위상차를  $\phi$ , 게이트 구동 전압과 피드백 전류의 위상차를  $\theta$ 라 할 경우 이 둘의 값이 일치해야 한다.

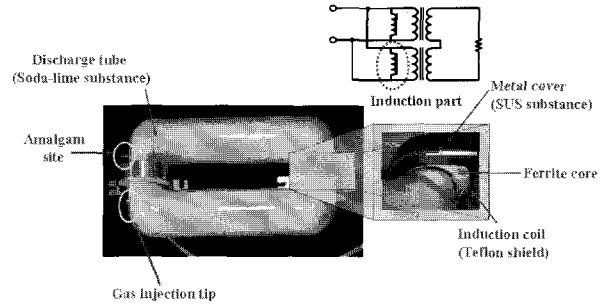


그림 2 제작된 ICP 광원과 유도 코일부분의 사진  
Fig. 2 Manufactured ICP light sources and induction-coil part

이때 인덕터 전류와 게이트 구동부의 인자들 사이에는 다음 (2)와 같은 관계가 성립된다.

$$(1/4)(V_z/f L_m) = (1/n)I_p \sin\theta \quad \text{식 (2)}$$

여기에서  $V_z$ 는 제너다이오드의 게이트단에 인가되는 전압,  $f$ 는 스위치의 동작주파수,  $L_m$ 은 전류트랜스포머의 2차측 자화인덕턴스,  $I_p$ 는 인덕터 전류의 피크값,  $n$ 은 전류 트랜스포머의 권선비 그리고  $\theta$ 는 인버터의 구형과 전압과 인덕터 전류의 위상차이다.

## 3. 실험

### 3.1. ICP 광원 준비

무전극 형광램프의 구조는 벌브, 유도 코일, 2개의 페라이트 및 페라이트 고정대로 구성되어 있다. 제작된 무전극 형광램프의 모습을 그림 2에 나타내었다. 방전관의 제작은 초기의 직관형 유리관을 'C'자 모양으로 구부려 만들고서 유리 방전관 내부에 형광물체를 도포한 후 동일한 방법으로 제작된 또 다른 유리 방전관을 이용하여 서로 접합하였다. 접합 시 주의할 사항은 접합면을 고온의 열을 이용하여 순간적으로 녹여서 접합하게 되는데 이 때 온도가 균일하게 분포하지 못하게 되면 접합면간의 계면(interface)에 작은 구멍(hole)이 생기에 되어 진공 파괴의 원인으로 작용하게 된다. 따라서 접합의 환경은 잘 조합된 혼합가스의 분위기에서 공기의 대류를 최대한 억제할 수 있는 항온의 공간 내에서 이루어질 필요가 있다. 접합된 방전램프의 좌우에는 가스를 주입할 수 있는 주입구와 가스를 배기 할 수 있는 배기구가 얇고 가는 형태의 유리관으로써 존재한다. 이러한 유리관을 통해서 가스의 배기와 주입이 이루어지는데 배기된 방전관의 진공도는 약  $10^{-6}$  Torr의 초기 압력을 이루게 된다. 배기 과정이 완료된 이후 내부에 잔류하는 불순물이나 수분 등의 제거를 위하여 100 °C정도로 열처리를 5분정도 행하였다. 열처리 과정이 끝나고 나서 MFC(mass flow controller)를 이용하여 가스 주입구(gas injection tip)을 통해 일정 압력대

의 크립톤(Krypton) 가스를 주입하였다. 페라이트 코어는 초투자율(initial permeability)이 2400에 해당하는 Mn-Zn 계열의 연자성체 재질을 사용하였다.

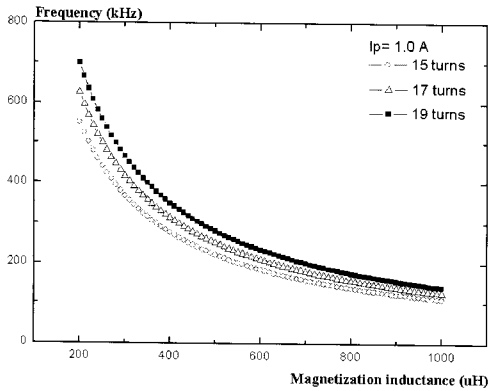


그림 3 페라이트 코어의 권선수에 따른 자화인덕턴스와 구동주파수간의 그래프

Fig. 3 Magnetization and Driving frequency graph depending on turns of ferrite core

이와 같은 동일한 과정을 통해 510 mm, 710 mm, 900 mm의 방전관 길이( $l$ )를 갖는 ICP 광원을 준비하였다. 단 판의 직경은 모두 동일하게 58 mm를 사용하였다.

#### 4. 결과 및 검토

##### 4.1. ICP 광원의 설계 인자간의 상호의존성

관계식 (2)를 이용함으로써 측정된 ICP 광원의 전기적 특성 결과를 통해 안정기의 설계 조건에 대한 정합 정도를 판단할 수 있다. 즉 제너다이오드의 게이트 단에 대해서  $V_2$ 의 값이 설정된 ICP용 고주파 안정기를 이용하여  $n$ 의 권선값을 갖는 페라이트 코어가 장착된 광원을 구동시키고 이때 출력되는 안정기의 전압 전류 위상차  $\theta$ 와 피크 전류값  $I_p$ 를 측정함으로써 구동주파수와 자화인덕턴스값  $L_m$ 의 변화를 예측할 수 있다.

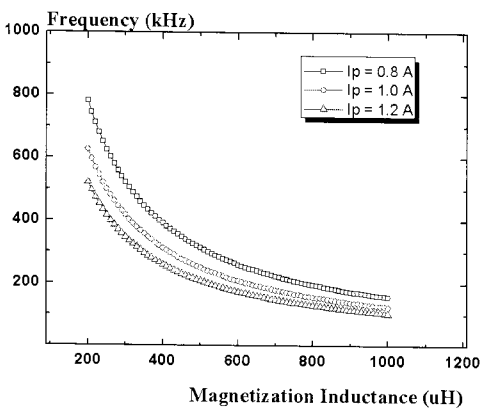


그림 4 안정기의 출력 전류값의 변화에 따른 자화인덕턴스와 구동주파수간의 그래프 ( $n=17$ )

Fig. 4 Magnetization and Driving frequency graph depending on output current of ballaster ( $n=17$ )

ICP 광원의 정격용량 설계 요소와 전기적 의존성

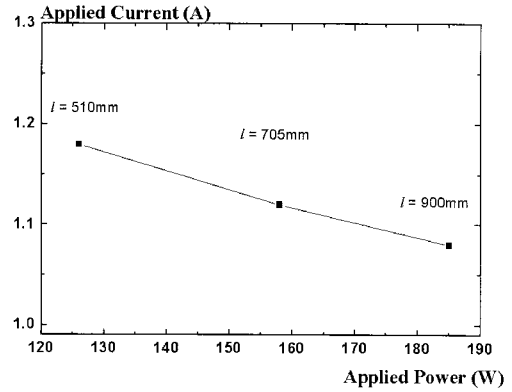


그림 5 광원의 길이에 따른 안정기 출력 전력과 전류

Fig. 5 Output power and current graph of ballaster depending on a length of a manufactured ICP light source

그림 3과 4는 관계식 (2)를 이용하여 임의의 설정된 조건들에 대해서 자화인덕턴스와 구동주파수간의 관계를 계산한 결과이다. 500  $\mu$ H의  $L_m$ 값을 갖는 안정기일 경우 그림 3과 4의 결과를 비교함으로써 동일한 구동주파수 영역을 설정하기 위한 인자(parameter)의 범위를 예측할 수 있다.

즉, 그림 3의 경우 권선수( $n$ )가 15에서 19까지 변화함에 따라 구동주파수의 변화폭은 약 90 kHz(1 turns당 2.25 kHz) 정도를 나타내었다. 이에 대해  $n$ 이 17턴일 경우, 전류값  $I_p$ 가 0.8 A에서 1.18 A까지 변화할 때 약 260.7 kHz(0.1 A당 65.175 kHz)정도 변화함을 그림 4를 통해 확인할 수 있다. 결과적으로 안정기의 구동 전류값 차  $\Delta I_p$ 가 약 0.4 A정도 일 때 이에 해당하는  $n$ 의 변화폭은 29턴 정도에 해당된다. 이때 사용된 샘플의  $l$ 은 705 mm이다.

##### 4.2. ICP 광원의 전기적 특성

구동전류를 최적화 하고자 할 때 권선값을 바꾸게 되면 예기치 못한 전력 손실과 주열 발생 문제를 야기할 수 있다. 따라서 광원의 구동 전류는 권선수의 변화보다는 방전관의 길이를 변화함으로써 제어하는 방법을 도입할 수 있다. 17턴의 권선값을 갖는 무전극 형광램프에 대해서 방전관 길이 변화에 따른 안정기의 출력 전력 변화를 측정하였다. 이때 방전관 길이( $l$ )가 각각 다른 3 종류의 시료 광원에 대해서 동일한 안정기를 사용하여 전원을 공급하였다. 그림 5는 각기 다른  $l$ 값을 갖는 시료 광원에 대해 안정기의 출력 전력-전류 변화를 측정된 결과로서 이때의 권선수( $n$ ) 값은 17턴이다. 각각의 샘플에 대해서 안정기의 출력이 다르게 인가되고 또한 길이가 증가함에 따라서 인가되는 전류는 감소함을 확인할 수 있다. 측정된 값으로는  $l$ 이 510 mm인 경우 1.18 A (126 W, 106.78 V), 705 mm인 경우 1.12 A (158 W, 141.07 V) 그리고 900 mm인 경우 1.08 A (185 W, 171.30 V)이다.

이러한 결과를 바탕으로 길이에 따른 광원의 임피던스( $Z$ )를 (3)과 같이 공식화 하였다.

$$Z = Z_0 + a_1 l + a_2 l^2 \quad (3)$$

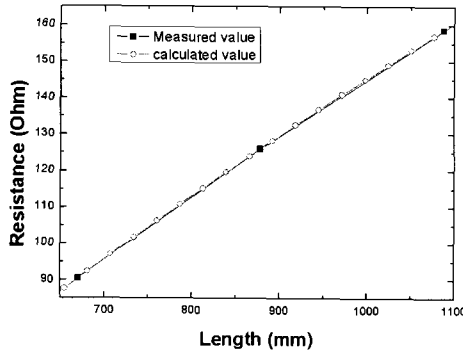


그림 6 길이에 따른 광원의 임피던스 변화

Fig. 6 Change of impedance of a manufactured ICP light source depending on a length

이때  $Z_0$ 는 온도와 길이 변화에 의존하지 않는 이상적인 임피던스 값으로  $-15.61012 \text{ ohm}$ , 그리고  $a_1$ 과  $a_2$ 는 비례상수 값으로서 각각  $0.22695$ ,  $-3.70809 \times 10^{-5}$ 이다.

(3)의 공식을 통해 얻은 결과와 측정된 값을 비교해 볼 때 잘 일치함을 그림 6을 통해 확인할 수 있다. 광원의 임피던스 성분이 길이에 대해서 2차함수의 형태로 표현되는 것은 길이의 변화가 단순 저항성분 이외에도 캐패시턴스의 성분 변화시키는 것으로 판단된다. 그러나 ICP 광원의 정격용량을 결정함과 동시에 설계가 이루어지는 과정에서 (3)을 이용하게 된다면 단순 저항성분과 캐패시턴스의 성분을 분리하여 고려할 필요가 없고 다만, 안정기의 출력 전압(V)에 대해서 전력( $P = V^2/Z$ ) 공식에 (3)을 대입함으로써 길이에 따른 광원의 정격용량을 이론적으로 계산 및 설계가 가능할 것으로 판단된다. 결과적으로 광원의 방전관 길이 변화는 광원의 제작 및 설계 과정에 대한 간편함과 더불어 권선수가 변화하는 경우와 비교해 볼 때 자화인덕턴스의 변화 없이 전기적 특성에 대한 해석이 가능하기 때문에 광원의 구동전류 제어를 위해 유용한 설계 요소라 판단된다. 이와 같은 설계 요소(1)를 전기적 저항 성분(Z)과 함께 공식화함으로써 설계 단계에서 광원의 정격용량 결정이 용이할 것으로 판단된다.

그러나 본 연구에서 고려되지 못한 점은 ICP 광원을 점등할 경우 주울열에 의한 페라이트 코어의 투자율 변화이다. 투자율의 변화는 안정기의  $L_m$ 값이 변하게 된다. 이것은 결과적으로 구동주파수 및 안정기의 출력 전력이 바뀌게 되는 요인으로 작용한다. 주울열에 대한 고려는 앞으로 더욱 연구를 진행함으로써 이해해야 할 필요가 있다.

본 연구는 Barkhausen의 안정기 발진 조건식에서 안정기의 설계 인자들에 대한 상호의존성을 알아보았다. 발진 조건식의 계산값을 통해 안정기의 출력 전류와 페라이트 코어의 권선  $n$ 의 구동주파수와와의 관계에서 볼 때 전류 제어는 큰폭의 권선수 변화가 이루어진다는 사실을 확인하였다. 그러나 권선수의 변화는 무전극 형광램프에서의 자화인덕턴스 변화와 과도한 주울열을 유도하기 때문에 방전관의 길이를 변화함으로써 전류값을 제어하였다. 방전관의 길이 변화에 따른 전류변화 결과는 임피던스와 방전관의 길이에 대한 공식으로 표현되었고 이와 같은 공식은 통해 무전극 형광램프의 정격용량을 설계하고 평가하는 이론적 근거로서 유용하게 적용될 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원사업(I-2004-0-074-0-00)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

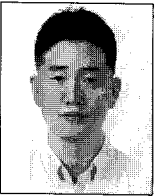
- [1] Miröslav sedlaček, "Electron Physics of Vacuum and Gaseous Devices", JOHN WILEY & SONS, INC., pp386-408, 1996.
- [2] Brian Chapman, "Glow Discharge Processes-sputtering and plasma etching," JOHN WILEY & SONS, INC., pp.65-72, 1980.
- [3] R. O. Dendy, "Plasma Dynamics," CLARENDON PRESS · OXFORD, pp 8-18, 1990.
- [4] J. R. Coaton and A. M. Marsden, "Lamps and Lighting", Fourth Edition, ANRNOLD, pp 1-336, 1997.
- [5] E. Robert, H. Sarroukh, C. Cachoncinlle, R. Viladrosa, V. Hochet, S. Eddaoui and J. M. Pouvesle, "Spectroscopic and electrical study of rare-gas-based, hollow cathode luminescent discharges: Application to the life time and efficiency enhancement of mercury-free signs", Pure and applied chemistry. : Chimie pure et appliquéé, Vol. 77, No. 2, pp. 463~474, 2005
- [6] J. Kawanaka, A. Ogata, S. Kubodera, W. Sasaki, K. Kurosawa, "Improved output characteristics of a vacuum ultraviolet xenon gas jet discharge lamp with a magnetic field", Applied physics. B, Lasers and optics, Vol. 65, No. 4, pp. 609~612, 1997
- [7] H. Motomura, M. Jinno and M. Aono, "Measurement of metastable xenon density in mercury-free fluorescent lamps by IR laser absorption spectroscopy", 2002 Joint Conference of ACED & K-J Symposium on ED and HVE, Vol. 1, pp 67~70, Nov. 2002
- [8] Zhi Li, philip K. T. Mok, Wing-Hung Ki and Johnny K. O. Sin, "A simple method to design resonant circuits of electronic ballast for fluorescent lamps", IEEE International Symposium on Circuits and System, pp 1744-1747, 1997.
- [9] Alysson Raniere Seidel, Fabio Ecke Bisogno, Humberto Pinheiro and Ricardo Nederson do Prado, "Self-Oscillating Dimmable Electronic Ballast", IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. 50, pp 1267-1274, 2003.
- [10] Ricardo N. do Prado, Saul A. Bonaldo Diego S. Greff, and Fábio E. Bisogno, "A Unity Power Factor Electronic Ballast for Fluorescent Lighting", IEEE Industry Application Society, Annual Meeting, pp 2366-2371, October 1997.

## 저 자 소 개



### 김 현 일 (金賢鎰)

1956년생. 1979년 충북대학교 전기공학과 졸업(학사). 1994년 광운대학교 전산대학원 컴퓨터공학과 졸업(석사). 현 동국대학교 대학원 재학중(박사과정). 현 산업자원부 기술표준원 신산업기술표준부장.



### 임 연 찬 (林涓贊)

1972년 생. 1998년 원광대학교 물리학과 졸업(학사). 2002년 동 대학원 물리학과 졸업(석사). 2006년 광운대학교 전자물리학과 졸업(이학박사). 현 원광대학교 전자재료공학과 Post BK21 박사후 연수과정.



### 박 대 희 (朴大熙)

1954년 생. 1979년 한양대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 일본 오사카대학 대학원 졸업(공학박사). 현 원광대학교 전기전자및정보공학부 교수.



### 장 홍 순 (張洪淳)

1955년생. 1978년 한양대학교 전기공학과 졸업(학사). 1986년 한양대학교 산업대학원 전자계산학과 졸업(석사). 1991년 미국 Univ. of IOWA 경영대학원 경영정보학(MIS)과 졸업(석사), 현 산업자원부 팀장, 현 산업기술대학교 지식기반 에너지대학원 초빙교수.



### 백 수 현 (白壽鉉)

1949년생. 1972년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현 동국대학교 전기공학부 교수.