

論文2002-39SC-3-6

## 메탈 할라이드 램프용 고주파 변조 방식 전자식 안정기의 디지털 제어기 개발

(Development of A Digital Controller of The Electronic Ballast using High Frequency Modulation Method for The Metal Halide Lamp)

吳德鎭\*, 金熙峻\*\*, 曹圭珉\*\*\*

(Duk-Jin Oh, Hee-Jun Kim, and Kyu-Min Cho)

### 요 약

본 논문은 메탈 할라이드 램프용 고주파 변조 방식 전자식 안정기의 디지털 제어기에 관한 것이다. 제안한 디지털 제어기에는 소프트 스타팅, 무부하 보호, 과전류 보호, 전력 제어 알고리즘이 포함되어 있다. 또한 제안한 디지털 제어기는 고주파 변조 제어 및 공명 현상회피 알고리즘을 수행한다. ASIC을 이용한 저가 양산을 위하여 제안한 제어기는 마이크로프로세서를 이용하지 않고 단지 FPGA만을 사용하여 설계하였다. 본 논문에서는 구체적인 디지털 제어 알고리즘들을 기술하였으며 프로토타입의 150W 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기의 실험 결과를 나타내었다.

### Abstract

This paper presents a digital controller of the electronic ballast using high frequency modulation method for the metal halide lamp. The proposed controller includes the control algorithm for soft starting, no load protection, over current protection and power control. The proposed digital controller, moreover, has the high frequency modulation scheme and the tracking algorithm to avoid acoustic resonance phenomena. For the math production with the low cost using the ASICs (Application Specific Integrated Circuit), the proposed digital controller has been designed with the FPGAs(Field Programmable Gate Array) only, without any microprocessor. In this paper, the detail digital control algorithms are described and the experimental results of prototype 150W metal halide electronic ballast are presented.

**Keyword** : digital controller, high frequency modulation, electronic ballast, metal halide lamp, FPGA

\* 正會員, 漢陽大學校 電氣工學科  
(Hanyang University Electrical Engineering)

\*\* 正會員, 漢陽大學校 電子·컴퓨터工學部  
(Hanyang University Division of Electrical and Computer Engineering)

\*\*\* 正會員, 柳韓大學 情報通信科  
(Yuhan College Information & Communications)

接受日字:2001年10月16日, 수정완료일:2002年1月14日

### I. 서 론

각종의 고휘도 방전 램프들 중에서도 특히 메탈 할라이드 램프는 뛰어난 연색성과 높은 광효율을 지니고 있어 백화점 쇼 윈도우 등의 각종 전시장 조명에서부터 무대의 스포트 라이트에 이르기까지 여러 요소에 사용된다. 그러나 대부분의 경우 부피가 크고 무거운 자기식 안정기를 적용하므로 설치 장소에 제약을 받고,

또한 설치 작업이 번거로운 단점을 지닌다. 따라서 근래에는 전자식 안정기가 갖는 소형, 경량 및 고효율의 이점을 위하여 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기의 채용이 점차 증가하고 있다. 그러나 현재, 대부분의 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기들은 수 백 Hz의 구형파 인버터에 의해 구동되는 저주파식 전자식 안정기이다. 이는 형광 램프 등의 저압 방전 램프들과는 달리 고압 방전 램프들이 지니는 공명 현상(Acoustic Resonance Phenomena)의 문제 때문에 고주파 구동이 용이하지 않기 때문인데, 그 이유는 고압 방전 램프들은 아크관 내 압력 파동의 고유 주파수가 통상의 고주파 전자식 안정기의 램프 구동 주파수 대역에 분포되어 있기 때문이다. 특히, 이들 고압 방전 램프들 중 메탈 할라이드 램프는 다수의 공명 주파수가 넓은 주파수 대역에 걸쳐 조밀하게 분포되어 있기 때문에, 고압 수은 램프 혹은 고압 나트륨 램프 등의 다른 고압 방전 램프에 비하여 고주파 전자식 안정기의 적용이 매우 어려운 실정이다. 따라서 최근의 메탈 할라이드 램프와 관련한 대부분의 연구들은 공명 현상을 제거하는 방법들에 초점을 맞춘다.<sup>[1-6]</sup>

필자들은 본 연구에 앞서 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기로서 20kHz에서 100kHz 사이의 고주파 영역에서 램프의 구동 주파수가 변조되는 고주파 변조 방식의 메탈 할라이드 전자식 안정기를 제안한 바 있다.<sup>[7]</sup> 그러나 상기 전자식 안정기의 경우 전압 제어 발진기 등의 선형 소자들로서 제어 회로를 구성하였기 때문에 노이즈 등에 취약할 가능성이 있고, 제어 회로의 부피가 크며, 회로 정수의 미세 조정이 요구되는 등, 해당 전자식 안정기를 양산하는 데에는 다소의 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 기 제안된 고주파 전자식 안정기의 각종 제어 알고리즘을 보완함과 더불어 제어기를 디지털화함으로써 안정기의 신뢰성을 향상시키고자 한다.

본 논문에서는 150W 메탈 할라이드 램프용 고주파 변조 방식 전자식 안정기의 주회로 및 디지털 제어기의 주요 알고리즘인 소프트 스타팅 방식의 점등 알고리즘, 무부하 보호 알고리즘, 주파수 변조 제어 알고리즘, 전력 제어 알고리즘 등과 더불어 실시간 공명 현상 검출 알고리즘 및 공명 현상 회피 알고리즘 등에 대하여 기술한다. 프로토타입으로 제작된 전자식 안정기로 수행된 실험 결과로써 제안한 디지털 제어기의 유용성을 검증한다.

## II. 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기 주회로 구성

### 1. 컨버터 및 수동 필터부

대부분의 전자식 안정기는 상용의 교류 전원으로부터 전력을 공급받아야 하므로 안정기의 인버터부에 직류를 공급하기 위해서는 필수적으로 컨버터부를 구성하고 있다. 다이오드 정류기를 사용하여 컨버터부를 구성할 경우 회로 구성이 간단하고 경제적이지만, 직류단 전압 필터로 사용되는 직류 링크 커패시터로 인하여 입력 전원 전류가 서지성으로 되어 입력 역률이 낮고, 전류 파형에 고조파가 많이 포함되므로 실용적 제약을 받는다. 따라서 안정기에 수동 필터부를 구성하여 입력 전원 전류를 필터링 하여야 한다. 한편, 근래에는 밸리 필(Valley Fill) 방식 또는 차지 펌프(Charge Pump) 방식의 수동 역률 개선 회로를 적용한 전자식 안정기가 많이 소개되고 있으나, 이들 수동 역률 개선 회로만으로 완벽한 고조파 대책을 수립하려면 수동 필터 회로가 상당히 복잡해지고 또한 및 회로의 특성상 1에 가까운 고입력 역률의 유지는 불가능하다.<sup>[8-10]</sup>

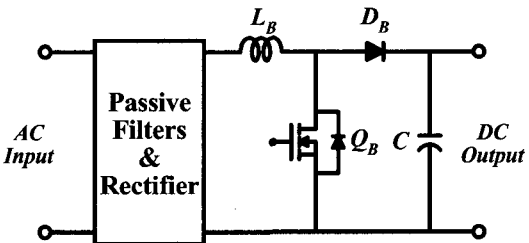


그림 1. 컨버터부 주회로 구성  
Fig. 1. Main circuit configurations of converter.

따라서 본 연구에서는 그림 1에 나타난 것과 같이 컨버터부에 부스트(Boost)형의 능동 역률 개선 회로(Active Power Factor Correction Circuit)를 적용하여 입력 역률을 거의 1로 유지되게 하였다. 능동 역률 개선 회로의 제어부는 넓은 범위의 입력 전압 조절 능력과 제어 회로의 단순화를 위하여, 주변 회로 구성이 비교적 간단하면서도 과전압 보호 기능이 내장된 Onsemi사의 부스트형 능동 역률 개선 회로 전용 제어 IC인 MC34262를 사용하였다.

한편, 전자식 안정기에 능동 역률 개선 회로를 적용

하는 경우 컨버터부와 인버터부가 모두 고주파 스위칭 동작을 하므로 방사 노이즈뿐만 아니라 특히 전도 노이즈 저감에 주의를 기울여야 한다. 본 연구에서는 전자식 안정기 동작에 따른 전도 노이즈 저감 및 능동 역률 개선 회로의 스위칭 주파수 성분의 전류 필터링을 위하여 그림 2와 같이 전원 입력단에 수동 필터 회로를 적용하였다. 여기서, 차동 모드인 경우 약  $1kHz$ , 공통 모드인 경우 약  $30kHz$ 의 차단주파수를 갖도록 노이즈 필터를 구성하였으며, 입력 전류에 대해 약  $5kHz$ 의 차단주파수를 갖도록 전체 수동 필터 회로를 구성하였다.

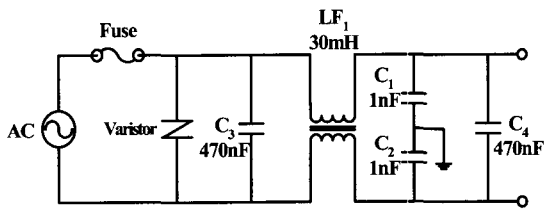


그림 2. 전원 입력단 수동 필터 회로  
Fig. 2. Passive filter circuits of the input power source side.

2. 인버터부

이 인버터부는 전자식 안정기의 핵심적인 부분으로, 본 연구에서 제안하는 고주파 변조 방식에 의하여 메탈 할라이드 램프를 구동하는 부분이다. 또한 본 연구에서 제안하는 안정기의 경우, 별도의 이그나이터 회로를 사용하지 않고 점등 전의 램프 상태와 주 회로에 삽입한 공진 소자를 이용하여 전기적 공진에 의하여 유기된 고압으로 메탈 할라이드 램프를 구동하는 메카니즘을 가진다.

그림 3에 본 연구에서 적용한 메탈 할라이드 램프용

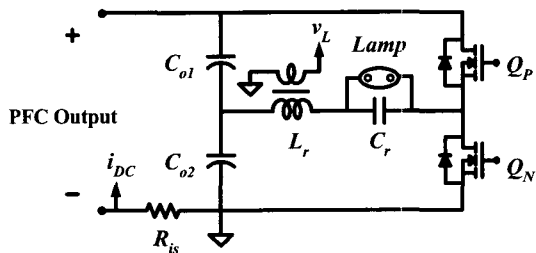


그림 3. 인버터부 주회로 구성  
Fig. 3. Main circuit configurations of inverter.

전자식 안정기의 인버터부 주회로를 나타내었다. 이는 두 개의 직류 링크 분압용 커패시터를 사용한 전압원 반 브리지 인버터에 기동 및 전력제어를 위한 공진 소자를 추가한 형태이다. 형광 램프 등 일반적인 전자식 안정기의 경우에는 직류 링크 분압용 커패시터를 사용하지 않고, 일명 직류 블록킹 커패시터라 불리는 커패시터를 이용한 반브리지 인버터를 적용한다. 그러나 본 연구에서 제안하는 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기의 경우 일정 주파수로 램프를 구동시키는 것이 아니고, 고주파 구동 시의 공명 현상을 피하기 위하여  $20kHz$ 에서  $100kHz$  사이의 고주파 변조된 넓은 범위의 주파수로 램프를 구동한다. 한편 램프의 정상 상태에 있어서, 주파수에 따른 부하 임피던스 변화율이 심할 경우 램프 전류의 파고율이 매우 커지고 또한 램프 전력 제어가 용이하지 못하다. 따라서 램프의 정상 상태에 있어 주파수에 따른 임피던스 변화율이 작도록 인버터 구성 비용의 증가를 감수하고서라도 그림 3에 나타난 바와 같이 주회로를 구성하였다.

한편, 기동 전 정상적인 램프의 등가 임피던스는 거의 무한대이다. 따라서 본 연구에서는 별도의 이그나이터 회로를 사용하지 않고, 인덕터  $L_r$ 과 램프와 병렬로 연결된 커패시터  $C_r$ 의 직렬 공진을 이용하여 수  $kV$ 의 고압을 커패시터  $C_r$ 에 유기시켜 램프 양단에 고압을 인가함으로써 램프를 구동시키고자 하였다. 램프가 구동되어 정상적인 아크 방전 상태로 되면 고주파 변조를 통하여 인덕터  $L_r$ 과 커패시터  $C_r$ 을 이용, 램프의 전력을 제어하도록 하였다. 여기서,  $L_r$ 과  $C_r$ 은 약  $50kHz$ 에서 기동시 충분한 공진전압을 유기할 수 있고, 점등시 정격전압에 근접한 램프 전압이 인가될 수 있도록 함으로써  $20kHz$ 에서  $100kHz$ 범위의 변조 주파수로 구동할 때의 평균 전력이 램프의 정격 전력에 근사하도록 선정하였다.

III. 디지털 제어기 구성

본 연구에서 제안하는 고주파 변조 방식 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기의 경우 전압 제어 발전기, 연산 증폭기 및 비교기 등의 선형 소자를 사용하여 그 제어회로 구성이 가능하다. 그러나 고주파로 스위칭하여 전력을 변환하는 주회로의 특성상 제어 회로가 전용 IC로 구성되지 않고 개별 소자를 사용하여 방대하게 구성될 경우 제어 회로의 용적이 커질 뿐만 아니라

노이즈에 취약하기 때문에 제어 회로의 제작에 매우 주의를 기울여야 한다. 따라서 본 연구에서는 제안하는 전자식 안정기의 핵심 부분인 인버터부를 디지털 제어 기로써 구성하고자 하였다.

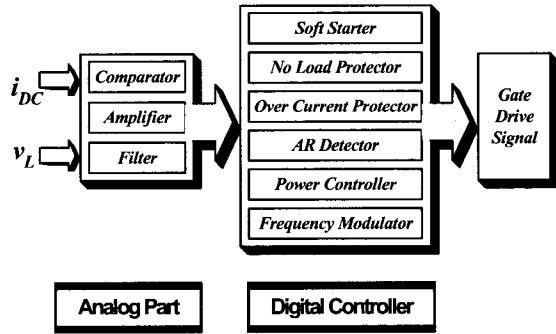


그림 4. 제어기 구성  
Fig. 4. Configurations of controller.

그림 4는 제안하는 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기의 제어기 구성을 나타내는 것으로, 선형 회로부와 디지털 제어기로 구분하여 그 기능 위주로 표시한 것이다. 디지털 제어기를 적용해도 검출계의 필터와 증폭 회로 및 비교기 회로는 필수이므로 그림과 같이 선형 회로부가 함께 구성된다.

디지털 제어기는 그림에 도시한 바와 같이 소프트 기동회로, 무부하 및 과전류 보호회로, 공명 현상 검출 및 회피 회로, 전력 제어 회로 및 주파수 변조 회로 등으로 구성되며, 전체 시퀀스를 관장하는 타이머와 기타 타이밍 회로가 포함된다. 여기에서는 주요 디지털 제어기 구성 알고리즘을 제시한 디지털 제어기 블록도를 기준으로 설명한다.

1. 고주파 변조 스위칭 신호 발생 알고리즘

그림 5에 고주파 변조 스위칭 신호 발생 방법을 나타내는 개념도 및 이의 구현 제어 회로 블록도를 나타내었다. 여기서 CMP는 비교기(Comparator)를 T는 toggle flip-flop를 나타낸다. 그림과 같이 기준 클럭을 계수하는 카운터와 스위칭 주기 데이터가 같아지는 순간 기준 클럭 카운터를 리셋 시킴과 동시에 토글 플립 플롭을 트리거 시킴으로써 가변 스위칭 주기 데이터에 의해 변조되는 고주파 변조 스위칭 신호 발생 회로를 구성하였다. 이 때, 가변 스위칭 주기 데이터는 약 200Hz에서 2kHz 사이의 주파수를 갖는 교류 성분의 삼각파와 전력 제어를 위하여 직류 성분이 가감된 변

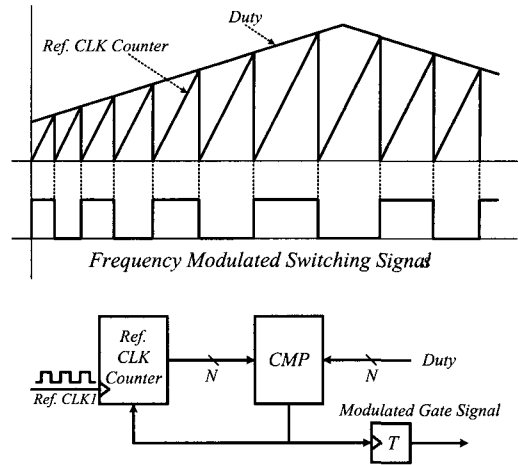


그림 5. 주파수 변조 스위칭 신호 발생기 회로 블록도  
Fig. 5. Block diagrams of the frequency modulated switching signal generator circuit.

조 지령 데이터에 해당한다.

카운터와 비교기의 비트 수를 N이라고 할 경우, 변조 주파수  $f_m$ 은 다음 식과 같은 범위에서 동작이 가능하다

$$\frac{f_{RC1}}{2^{N+1}} \leq f_m \leq f_{RC1} \tag{1}$$

여기서,  $f_{RC1}$ 은 사용되는 기준 클럭의 주파수이다.

일례로, 기준 클럭으로 10MHz를 이용하고 8비트의 카운터와 비교기를 사용하는 경우, 주파수 변조된 스위칭 신호의 최소 주파수는 약 19.53kHz이다. 만일 이보다 더 낮은 주파수 범위까지 변조 주파수 범위를 확장하기 위해서는 카운터와 비교기의 정도를 높이든지 아니면 기준 클럭의 주파수를 낮추어야 한다. 그러나 기준 클럭의 주파수를 낮추는 경우에는 변조된 스위칭 신호의 정도가 떨어질 수 있으므로 이에 유의해야 한다. 한편, 주파수 변조된 스위칭 신호의 최고 주파수를 100kHz 정도로 설정하는 경우 위의 일례와 같이 기준 클럭으로 10MHz를 사용한다면 변조되는 최대 주파수 스위칭 신호의 반주기는 5μsec가 되며, 0.1μsec 단위로 반주기를 제어할 수 있으므로 실용적으로 사용하는 데 제어의 정도에는 무리가 따르지 않을 것으로 판단된다.

2. 변조 신호 발생 알고리즘

그림 6과 그림 7은 각각 변조 신호 발생 블록도 및 램프의 점등 시부터 정상상태에 이르기까지의 변조 신

호의 추이(스위칭 듀티의 변화)를 나타내는 것으로, 그림 6은 본 논문에서 제안하는 디지털 제어기에 있어 가장 중추적 기능을 갖는 부분이다. 데이터 로딩이 가능한 업/다운 카운터를 이용하여 변조 신호를 삼각파형으로 발생시키고자 하였다. 이 때, 카운트 업 또는 카운트 다운 기능만 이용하는 경우 톱니파형 또는 역톱니파형으로 주파수 변조 신호를 발생할 수도 있다. 또한 그림 6에는 후술되는 소프트 스타팅 방식의 기동 알고리즘을 구현하는 회로가 포함되어 있다.

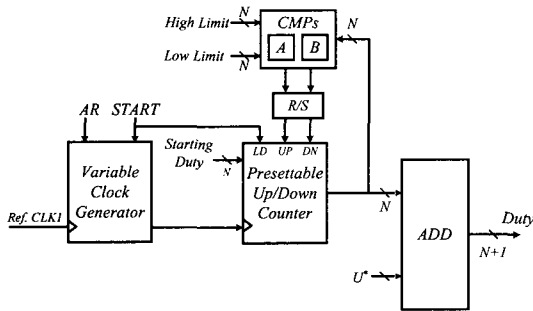


그림 6. 변조 신호 발생기 회로 블록도  
Fig. 6. Block diagrams of the modulation signal generator circuit.

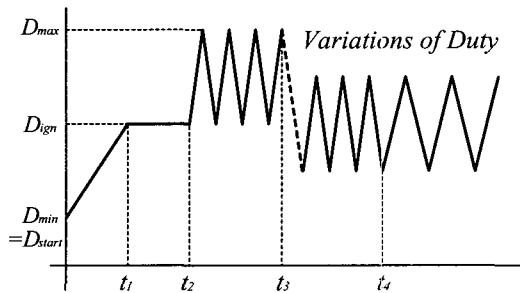


그림 7. 변조 신호 개형  
Fig. 7. Outline of the modulation signal.

그림 6에서, 변조 신호의 주파수는 기준 클럭을 입력 받아 주파수를 분주하여 가변 주파수의 클럭을 생성하는 가변 클럭 발생기에서 제공되는 클럭의 주파수를 조정함으로써 변조 신호의 주파수를 제어할 수 있도록 하였다. 또한, 변조 신호의 크기는 업/다운 카운터의 업/다운 전환 시점의 변경으로 가능하며 이는 업/다운 카운터의 출력값과 기 설정된 상한치 데이터와 하한치 데이터를 두 개의 비교기를 사용하여 비교하고 R/S 플립플롭을 이용, 업/다운 모드를 변경함으로써 이루어진다. 변조 신호의 주파수  $f_{mf}$ 는 업/다운 카운터에 입력되는

클럭의 주파수를  $f_{ud}$ 라 하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{mf} = \frac{1}{2f_{ud}(H_L - L_L)} [Hz] \quad (2)$$

여기서,  $H_L$ 과  $L_L$ 은 각각 업/다운 카운터의 상한치 데이터 및 하한치 데이터이다.

한편, 전력 제어를 위하여 전력 제어기에서 제공되는 제어 입력 데이터와 이 변조 신호 데이터를 가산하여야 하므로 이를 구현하는 가산기를 설치하였다. 업/다운 카운터와 제어 입력 데이터의 비트수가  $N$ 일 경우 가산기는  $(N+1)$ 비트의 출력을 가진다. 이 가산기의 출력이 최종 주파수 변조 신호가 되는 것이며 디지털 제어기의 내부에서는 가변 되는 주기 데이터에 해당한다.

3. 기동 및 무부하 보호 알고리즘

본 연구에서 제안하는 전자식 안정기는 램프를 초기 기동시킬 때 공진을 일으켜 램프 양단에 고압을 유지, 점등시키는 방식을 채택하고 있다. 이를 위해서는 부하 회로의 고유 공진 주파수 부근의 주파수로 인버터를 구동시켜야 하는데, 회로에 급작스러운 고압을 발생시킬 경우 스위칭 소자를 비롯하여 주회로의 구성 요소에 무리를 주게 된다. 또한 이러한 급작스러운 고압의 발생은 제어 회로에도 큰 노이즈를 유발시킨다. 따라서 본 연구에서는 램프 초기 기동시 램프 양단 전압을 서서히 증가시키는 소프트 스타팅 알고리즘을 디지털 제어기로 구현하였다.

본 연구에서는 그림 7에 나타난 것과 같이 기 설정된 일정 시간의 소프트 스타팅 시간( $t_1$ ) 동안 변조 주파수 범위의 최고 주파수( $1/2D_{start}$ )에서부터 주파수를 서서히 감소시켜 충분한 점등이 가능한 고유 공진주파수 부근의 주파수( $1/2D_{ign}$ )까지 기동 주파수를 낮추는 방법으로 램프를 기동하는 소프트 스타팅 알고리즘을 적용하였다. 이 소프트 스타팅 알고리즘을 구현하는 제어기는 그림 6에 나타난 바와 같이 전체 시퀀스를 관장하는 타이머에서 램프 기동신호인 Start 신호를 발생하면 업/다운 카운터의 로딩 데이터에 기 설정된 Starting Duty 데이터를 로딩시킴으로써 초기 기동 주파수를 선정하도록 하였다. 이 때, 시간  $t_1$  동안 듀티가  $D_{start}$ 에서  $D_{ign}$ 까지 변해야 하므로 가변 주파수 클럭 발생기는 다음 식으로 주어지는 주파수의 클럭을 발생시켜야 한다.

$$f_{UD} = \frac{f_{RC1}(D_{ign} - D_{start})}{t_1} \text{ [Hz]} \quad (3)$$

한편, 가열되지 않은 램프의 경우 통상 수 kV를 인가하면 수 msec 이내에 방전이 이루어진다. 만일 램프가 없는 상태 혹은 고온 등 램프가 정상적으로 기동되기 어려운 상태일 경우, 지속적으로 인버터를 운전시킨다면 스위칭 소자가 파손될 가능성이 크다. 따라서 본 연구에서는 시간  $t_1$ 에서 부하단 인덕터 전압의 크기로써 정상 점등 유무를 판단하여 점등 실패 시 게이트 신호가 차단되는 무부하 보호 알고리즘을 적용하였다. 통상의 경우 램프 양단의 전압을 분압용 저항을 사용하여 검출하거나 램프 전류를 CT를 사용하여 검출함으로써 점등 상태를 판단한다. 그러나 기동시에는 램프에 고압이 유기됨과 동시에 정격에 비하여 매우 큰 서지성 전류가 흐르게 되므로 램프의 전압 혹은 전류를 직접 검출하는 방법 보다는 부하단 인덕터 전압의 크기로써 점등 상태를 판단하는 것이 보다 안정적이 된다. 이는 부하단 인덕터에 보조 권선을 감아 인덕터 전압을 검출하여 비교기로써 이의 크기를 판단하고 그 결과에 따라 게이트를 차단하는 간단한 알고리즘이므로 본 논문에서는 이에 대한 구체적인 제어 블록도는 생략하였다.

시간  $t_1$ 에서 정상 점등이 이루어졌을 경우 그림 6에 도시한 가변 클럭 발생기는 시간  $t_2$ 에 이를 동안 클럭 발생을 멈춤으로써 일정한 주파수로 초기 아크의 안정된 상태를 확보할 수 있도록 하였다. 시간  $t_2$  이후에는 전력 제어가 동작하기 시작함과 동시에 가변 클럭 발생기에서 기 설정된 변조 신호 주파수를 발생할 수 있도록 업 다운 카운터에 클럭을 공급함으로써 램프의 구동 주파수를 변조하여 정상 운전 상태로 돌입하도록 하였다.

4. 전력 제어 알고리즘

그림 8은 가변 이득의 적분 제어를 기반으로 하는 전력 제어 블록도이다. 제한하는 안정기의 경우 부스트형의 능동 역률 개선 회로를 적용하고 있으며 이 능동 역률 개선 회로는 입력 역률의 제어와 더불어 직류단 전압을 일정으로 제어하고 있다. 따라서 직류단의 전류는 곧 램프 구동용 인버터의 입력 전력에 대한 지표로 사용할 수 있고, 스위칭 손실 등 인버터의 평균 전력 손실을 일정한 것으로 가정하면, 직류단의 전류를 램프 전력의 지표로 사용하는 것이 가능하다. 따라서 본 연

구에서는 직류단 전류를 제어함으로써 간접적으로 램프의 전력을 제어하고자 하였다. 이 때, 직류단 전류에는 입력 전원 주파수, 컨버터부와 인버터부의 스위칭 주파수 및 변조 주파수에 해당하는 주파수 성분이 함유되어 있으므로 저역 통과 필터를 이용하여 이들 주파수 성분을 제거하여야 한다.

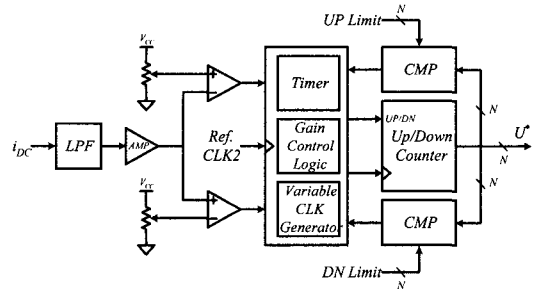


그림 8. 전력 제어 회로 블록도  
Fig. 8. Block diagrams of the power controller circuit.

한편, 본 연구에서는 회로의 간략화를 위하여 직류단 전류를 A/D 변환하지 않고 그림 8에 도시한 바와 같이 두 개의 비교기를 이용하여 직류 전류의 레벨을 소정의 폭 내에 위치하도록 제어하는 방법을 적용하였다. 따라서 두 개의 비교기 신호의 조합에 따라 현재 상태의 오차 극성을 판단하고 이에 따라 업/다운 카운터를 동작시킴으로써 제어 입력의 크기를 가감하는 방식으로 전력 제어를 구성하였다. 이 때, 업/다운 카운터의 오버플로우 방지 및 제어 입력의 범위를 제한하기 위해서는 업/다운 카운터 출력에 적절한 상,하한 제한치를 설정해야 한다. 따라서 두 개의 비교기를 이용하여 업/다운 카운터의 출력값과 기 설정된 상한치 데이터와 하한치 데이터를 비교하여 카운터의 증감을 멈추도록 회로를 구성하였다. 그리고 기설정된 오차 극성에 머무르는 시간을 계수하는 타이머를 두어, 그 크기에 따라 가변 주파수 발생기의 클럭 주파수를 증감하여 업/다운 카운터를 구동함에 의하여 가변 이득 적분 제어를 구성하였다. 이 전력 제어기의 출력인 제어입력  $U^*$ 는 그림 6에 나타낸 가산기에 입력되어 최종 주파수 변조 신호의 직류레벨을 가감함으로써 램프 전력을 제어하게 된다. 이 때, 램프가 충분히 가열되기 이전에는 램프 전력이 정격에 못 미치므로 변조 운전 초기에는 전력 제어가 포화된 상태이다. 따라서 램프가 정격 전력을 소비할 수 있는 상태가 되는 시간  $t_3$ 까지 램프는 가장

낮은 영역의 주파수 범위에서 변조가 이루어진다. 제안하는 안정기의 경우 최저 주파수( $1/2D_{max}$ )를 약 20kHz로 설정, 램프의 구동이 항상 가청 주파수 이상으로 유지될 수 있도록 하였다. 한편 램프 구동 최고 주파수( $1/2D_{min}$ )는 스위칭 손실 등을 고려하여 100kHz로 설정하였다.

5. 공명현상 검출 및 회피 알고리즘

그림 9에 메탈 할라이드 램프 공명 주파수 분포의 한 예를 도시하였다. 이는 본 연구에서 적용한 램프 중의 하나인 OSRAM사의 HQI-TS 150W 메탈 할라이드에 대한 것이다. 램프의 압력 파동 주파수는 램프 구동 주파수의 두 배에 해당하므로 그림 9은 공명 주파수를 램프 구동 주파수로 환산하여 나타낸 것이다.

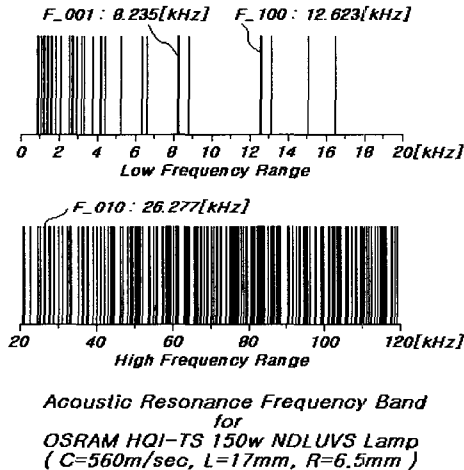


그림 9. 메탈 할라이드 램프 공명 주파수 분포 일례  
Fig. 9. An example of the acoustic frequency distribution for the metal halide lamp.

그림에서 알 수 있듯, 20kHz 이상의 고주파 대역에 있어서는 거의 모든 주파수에서 공명 현상을 일으킬 가능성이 있다. 각 주파수에서의 진동 폭은 각기 다르기 때문에 아크의 켜, 소음 등의 미미한 공명 현상이 발생할 수도 있고, 심한 플리커 현상이 발생할 수도 있으며 심할 경우 아크가 소멸되기도 한다. 따라서 해당 메탈 할라이드 램프를 고정의 고주파로 구동시키는 것은 거의 불가능한 일이다. 따라서 본 연구에서는 고주파 변조를 통하여 램프 구동 주파수를 일정한 주파수에 머물지 않게 함으로써 메탈 할라이드 램프의 공명 현상을 피할 수 있도록 디지털 제어기를 구성하였다. 그러나 그림 9에 도시하였듯 공명 주파수의 서브 하모

닉까지 고려한다면 제안하는 디지털 제어기와 같이 일정한 변조 주파수의 삼각파형으로 램프 구동 주파수를 변조하는 방식은 완벽하다고 장담할 수는 없다. 즉 변조 삼각파형의 기본파 혹은 고조파가 공명 주파수의 서브 하모닉 주파수와 일치하게 되는 경우 공명 현상이 발생할 가능성이 있다. 또한 초기 제어기 제정수 설정 시 변조신호 주파수 선정에 있어 공명 현상이 일어나지 않는 주파수로 선정하여도 램프 종류의 변경 또는 사용 시간에 따라 램프의 특성이 바뀌게 되면 램프에 공명 현상이 발생할 가능성이 있다. 따라서 이 공명 현상을 실시간으로 검출하여, 공명 현상을 회피하는 알고리즘의 수립이 요구된다.

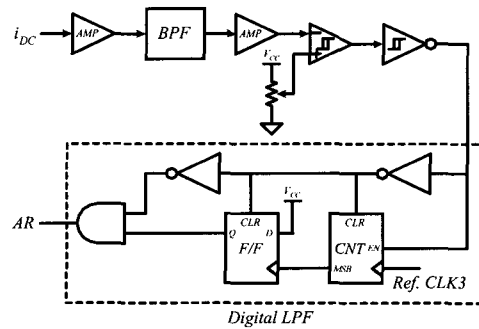


그림 10. 공명 현상 검출기  
Fig. 10. Detector of acoustic resonance phenomena.

본 연구에서는 그림 10에 나타낸 것과 같은 실시간 공명 현상 검출기를 제안한다. 메탈 할라이드 램프에 공명 현상이 발생할 경우 램프의 임피던스가 변동한다. 따라서 램프 전력에 변동이 생기고, 이는 곧 직류단 전력의 변동으로 이어지므로, 본 연구에서는 직류단 전력의 지표인 직류단 전류로부터 전력 변동의 유무를 검출하여 이를 공명현상 유무의 지표로 사용하고자 하였다. 이 때, 앞서 기술한 바와 같이 직류단 전류에는 컨버터 및 인버터의 스위칭 주파수, 변조 주파수 그리고 전원 주파수 성분이 포함되어 있다. 그러나 통상 육안으로 식별 가능한 공명현상의 경우 그 주파수가 적어도 전원 주파수 이하이므로 그림 10에 도시한 바와 같이 증폭기와 대역 통과 필터를 사용하여 저주파 대역의 램프 전력의 변동분을 검출하고 히스테리시스 비교기를 이용하여 공명현상의 유무를 판정하는 실시간 공명현상 검출 알고리즘을 수립하였다. 또한 이 공명 현상 검출기에서 공명 현상이 발생한 것으로 판단될 경우, 해당 정보를 그림 6에 도시한 가변 주파수 클럭 발생기에 입력하여

변조 주파수를 변경하는 방식의 공명 현상 회피 알고리즘을 수립하였다. 공명 현상 검출기의 경우 선형 회로가 주가 되므로 노이즈 등에 의한 오동작의 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 공명 현상 검출기의 선형 회로부 출력 신호가 기 설정된 기간 보다 짧을 경우 해당 정보를 무시하도록 디지털 제어기에서 다시 한 번 필터링 함으로써 공명 현상 검출기의 오동작에 따른 불필요한 변조 주파수 변경을 방지할 수 있도록 디지털 제어기에 디지털 필터부를 구성하였다.

이상으로 본 논문에서 제안하는 디지털 제어기의 주요 알고리즘들을 살펴보았다. 이 외에도 시스템 이상 등으로 직류단 전류가 기 설정치 이상이 될 경우 동작되는 과전류 보호 기능이 포함되어 있으며, 이는 기준 전압과 필터링된 직류단 전류의 크기를 선형 회로로써 비교하여, 과전류 시 인버터 게이트 신호를 차단하도록 하는 간단한 알고리즘이므로 본 논문에서는 구체적인 제어 블록도는 생략하였다. 다만 과전류 검출용 비교기 출력을 디지털 제어기에서 타이머와 플립플롭을 이용하여 다시 한 번 필터링하였으며 이에 사용된 디지털 필터회로는 그림 9에 적용한 것과 동일한 구성이다. 전술한 바와 같이 각각의 제어기들은 전체 시퀀스를 관장하는 총괄 제어 회로에 의하여 기동에서부터 정상 운전시 까지 적절하게 제어되어야 함을 알 수 있다. 이는 다수의 타이머와 플립플롭 등의 다소 복잡한 시퀀스 논리회로로 구성되며, 이의 기능에 대하여는 전술한 내용으로부터 유추가 가능하므로 구체적인 회로 설명은 본 논문에서는 생략하기로 한다.

IV. 실험 결과 검토 및 고찰

그림 11은 본 연구에서 제안한 디지털 제어기를 적용하여 프로토타입으로 제작된 150W 메탈 할라이드 램프용 고주파 변조 방식 전자식 안정기의 외관을 보여 주는 것으로, 안정기 부피 축소를 위하여 인버터 제어 회로부는 별도의 기판에 제작하여 본체에 커넥터를 이용하여 탑재하는 방식을 적용함으로써 190mm\*85mm\*45mm 케이스에 탑재가 가능하였고, 케이스를 제외한 안정기의 중량은 약 570g으로 컴팩트한 제작을 이룰 수 있었다.

실험에 적용한 주요 정수 및 각종 파라미터는 표 1에 나타낸 바와 같다. 표 1에서  $\omega_r$ 은  $L_r$ 과  $C_r$ 의 고유 공진 주파수이며,  $f_o$ 와  $f_m$ 은 각각 램프 구동 주파수의

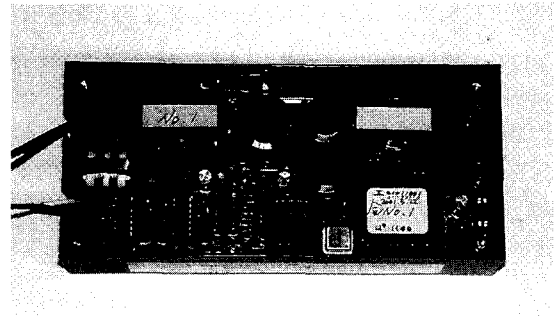


그림 11. 150W 메탈 할라이드 램프용 고주파 변조 방식 전자식 안정기

Fig. 11. Electronic ballast using high frequency modulation method for a 150W metal halide lamp.

표 1. 시스템 정수 및 파라미터

Table 1. System constants and parameters.

$V_{ac}$	220 V	$f_o$	20k-100kHz
$C_{in}$	100nF	$f_m$	200-2kHz
$L_B$	510μH	$Q_B$	IRFP450
$V_{dc}$	370 V	$Q_P, Q_N$	IRF840
$C_{o1}, C_{o2}$	470μF	$t_1$	6.3 msec
$L_r$	400μH	$t_2$	13.4 sec
$C_r$	30nF	$t_{retrigger}$	53.7 sec
$\omega_r$	45.9kHz	LAMP	150 W MHD

범위 및 변조 신호 주파수의 범위이다. 그리고  $t_{retrigger}$ 는 램프 기동 반복 시간으로 본 연구에서는 고온 등 램프의 불안정으로 인하여 기동에 실패하였을 때 약 53.7초 마다 재기동 하도록 하였다.

먼저 그림 12는 기동시 램프 양단의 전압 파형을 나타낸 것으로 정상적인 기동이 이루어지는 경우(위)와 무부하시 램프 구동용 인버터 보호를 위하여 기동 시점에서부터 약 6.3msec가 될 때까지 기동이 이루어지지 않아 게이트 신호를 차단함에 따라서 부하단 전압이 0으로 되는 경우(아래)이다. 소프트 스타팅 기동을 적용함에 따라 램프 양단 전압이 저압에서부터 서서히 증가하다가 부하의 공진점 부근의 주파수에서 고압이 유지됨을 볼 수 있다. 램프가 정상적으로 기동이 되지 못할 경우에는 전술한 바와 같이 약 53.7초 마다 기동



시퀀스가 반복되며, 디지털 제어기에서는 점등 실패의 횟수가 소정의 횟수 이상이 될 경우 알람을 출력함과 동시에 전체 시스템을 완전히 트립시킨다.

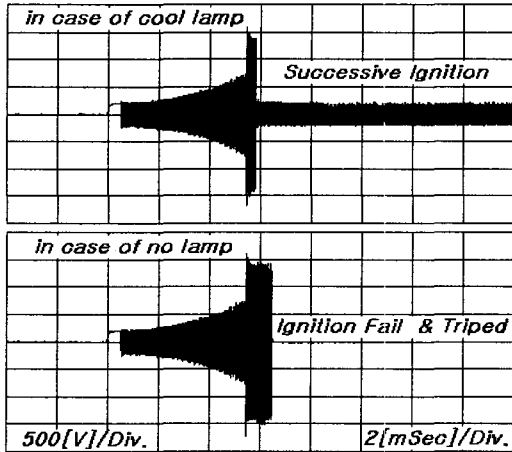


그림 12. 기동시 램프 전압 파형  
Fig. 12. Lamp voltage waveforms at starting.

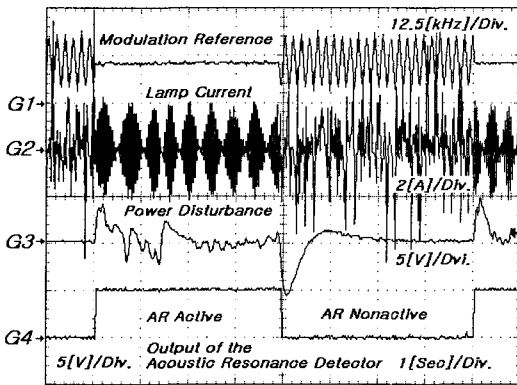


그림 13. 일정/변조 주파수 운전시 각부 파형  
Fig. 13. Waveforms at the constant frequency and the modulated frequency operation.

그림 13은 본 연구에서 적용한 실시간 공명 현상 검출기의 성능을 평가하기 위하여 약 4초씩 일정 주파수 운전 및 주파수 변조 운전을 반복하였을 때의 변조 신호, 램프전류, 직류단 전류의 맥동분 및 공명 현상 검출기의 출력 파형을 나타낸 것이다. 여기서, 본 연구에서 제안한 디지털 제어기의 경우 변조 신호 데이터를 외부로 출력하지 않기 때문에 그 개형을 관측할 수가 없어, 본 파형은 동일한 알고리즘을 갖는 선형 제어기를 적용한 안정기로 관측된 파형이다. 한편, 관측에 사용한 오실로스코프의 샘플링 한계로 인하여 엘리어링 현상

이 일어난 상태이므로 변조 신호와 램프 전류의 파형은 정확한 파형이 아니며 다만 그 개형만을 나타내는 것이다. 그러나 그림 13으로부터 본 연구에서 제안한 공명 현상 검출기가 잘 동작함을 알 수 있으며, 일정 주파수 운전시에는 공명현상이 발생하나 고주파 변조 운전시에는 공명 현상이 발생하지 않음을 알 수 있다. 특히 일정 주파수로 운전하다가 고주파 변조 방식으로 운전을 전환하면 그 즉시 공명 현상이 제거됨을 알 수 있다. 디지털 제어기를 적용한 실험에 있어서는 공명 현상 검출기가 동작하는 경우 기 설정된 4단계의 변조 주파수를 순차적으로 변경하여 공명 현상을 회피할 수 있도록 하였으나, 실제 실험에 있어서는 고주파 변조에 의하여 공명 현상이 거의 일어나지 않았기 때문에 공명 현상 회피 알고리즘 동작에 의한 변조 주파수의 변화는 없었다. 그러나 장시간의 램프 경년 변화 등이 있을 경우 공명 현상 회피 알고리즘은 유용하게 작용할 것으로 판단된다.

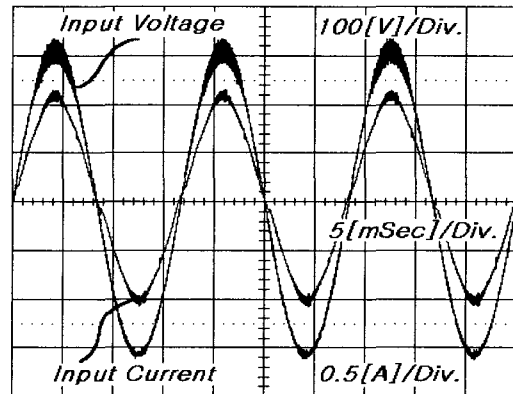


그림 14. 입력 전압, 전류 파형  
Fig. 14. Input voltage and current waveforms.

그림 14는 램프의 정상 상태 운전시, 전원 입력단의 전압, 전류 파형을 나타내는 것이다. 수동 필터와 능동 역률 개선 회로에 의하여 전류의 파형이 정현적으로 유지됨과 동시에 입력 전압과 동상을 이루어 거의 1에 가까운 입력 역률을 가짐을 확인 할 수 있다.

끝으로 램프 전압, 전류 파형 및 램프의 임피던스 변화를 나타내주는 특성 곡선을 그림 15에 나타내었다. 고주파 변조 방식의 운전에 의하여 램프의 임피던스가 순차적으로 변화하고 있음을 알 수 있으며, 그림으로부터 현재 동작되는 주파수 변조 범위에 있어서의 램프의 등가 임피던스는 평균적으로 약 45Ω 정도임을 알

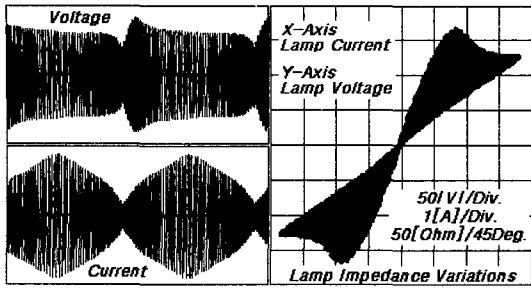


그림 15. 램프 전압 전류 파형 및 특성 곡선  
 Fig. 15. Lamp voltage and current waveforms and its characteristic curve.

수 있다. 램프 구동 주파수가 수시로 변화함에 따라 램프의 등가 임피던스도 약 20Ω 이상의 폭으로 수시로 가변 되고 있으나, 본 연구에서 적용한 전력 제어 알고리즘은 직류단 전류를 제어함으로써 간접적으로 램프의 평균 전력을 제어하는 방식을 택하였기 때문에 아무런 이상 없이 램프의 전력이 잘 제어됨을 확인할 수 있었다. 그러나 램프 전류의 파고율이 다소 클 것임을 볼 수 있는데 이는 지속적인 연구를 통하여 최적의 변조 신호의 패턴을 개발함으로써 보완될 수 있을 것으로 판단된다.

### V. 결 론

본 논문에서는 고주파 변조 방식의 메탈 할라이드 램프용 전자식 안정기의 디지털 제어를 제안하였으며 제어기가 수행하는 각각의 제어 알고리즘에 대하여 기술하였다. 특히 본 논문에서 제안하는 디지털 제어기는 마이크로프로세서를 이용하지 않고 제어기 일체를 이산 논리회로로 설계, FPGA로 구현함으로써 향후 제어기 양산시 ASIC을 통한 저가 구현이 가능하도록 하였다. 뿐만 아니라 별도의 이그나이터를 사용하지 않는 공진 방식의 기동 메카니즘에 소프트 스타팅 방식의 기동 알고리즘을 적용함으로써 안정된 기동을 꾀하였으며, 전력 제어 알고리즘 및 무부하 보호 알고리즘 등의 실용 안정기에 요구되는 제반 필수 제어 알고리즘을 모두 구현하였다. 한편, 컨버터부에 부스트형 능동역률 개선 회로를 적용하고, 인버터부는 고주파 변조 방식을 적용한 프로토타입의 150W 메탈 할라이드 램프용 고주파 변조 전자식 안정기를 제작하여 수행된 실험 결과로써 제안한 디지털 제어기의 유용성을 검증하였다.

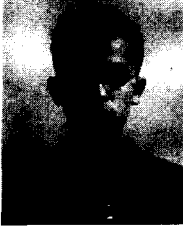
추후 연구 과제로는 변조 신호 패턴에 따른 램프 특성 평가 실험, 메모리를 추가하여 안정된 점등 상태의 데이터를 기록해 두어 재 점등 시 다시 적용하는 방식의 회로 개발, 양산 제품을 위하여 고신뢰성을 갖도록 각종 제어 알고리즘을 보다 완벽하게 보완하는 것 등이다.

### 참 고 문 헌

- [1] Chr. Meyer, H. Nienhuis "Discharge Lamps," Philips Technical Library Kluwer Technische Boeken B.V. Deventer, pp. 215-248, 1988.
- [2] M. Gulko, S. Ben-Yaakov, "A MHz electronic ballast for automotive type HID lamps" 28th Annual IEEE, Power Electronics Specialists Conference Vol.1, pp. 597-605, PESC'97, May/June.
- [3] H. Peng, S. Ratanapanachote, P. Enjeti, I. Pitel, "Evaluation of Acoustic Resonance in Metal Halide (MH) Lamps And An Approach to Detect Its Occurrence" Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97., Vol.3, pp. 2276-2283, 1997.
- [4] 김기정, 박종연 "메탈 할라이드 방전과 내의 음향 공명을 감소시킨 전자식 안정기 설계" 전력전자학회 논문지, 제4권, 제5호, pp. 405-412, 1999
- [5] Wei Yan, et al, "Investigation on Methods of Eliminating Acoustic Resonance in Small Wattage HID Lamps", Industry Applications Conference 2000, Vol.5, pp. 3399-3406, 2000.
- [6] Laszlo Laskai, et al, "White-Noise Modulation of High-frequency High-Intensity Discharge Lamp Ballasts", IEEE Transactions On Industry Vol.5, pp. 3399-3406, 2000.
- [7] 문태환 외 3인, "메탈할라이드 램프용 고주파 변조 방식 전자식 안정기", 전력전자학회 하계학술대회논문집, 2001
- [8] Alling, W.R., "Preserving lamp life using a low cost electronic ballast with compact fluorescent lamps, a new approach", Industry Applications Society Annual Meeting, Vol.3, pp. 2247-2253, 1993.

- [9] Fengfeng Tao, Lee F.C, Onishi N., "A self-oscillating drive for single-stage charge-pump power-factor-correction electronic ballast with frequency modulation", Industry Applications Conference, 2000, Vol.5, pp. 3367-3373 , 2000.
- [10] Wood, P.N., "Flourescent ballast design using passive PFC and crest factor control", Thirty-Third IAS Annual Meeting, Vol.3, pp. 2076-2081, 1998.

## 저 자 소 개



吳 德 鎮(正會員)

1997년 : 한양대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1999년 : 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정



曹 圭 珉(正會員)

1985년 : 인하대학교 공대 전기공학과 졸업(학사). 1991년 : 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 : 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 : 유한대학 정보통신과 조교수



金 熙 峴(正會員)

1976년 : 한양대 공대 전자공학과 졸업(학사). 1978년 : 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1986년 3월 : 일본 큐슈대 대학원 전자공학과(공학박사). 1987년~현재 : 한양대학교 전자·컴퓨터공학부 교수.

1991년~1992년 : 미국 버지니아공대 방문교수. 1987년~현재 : ㈜동아일렉콤 기술고문