

## Fuzzy logic Controlled Electronic Ballast for HID Lamps

金柄哲\* · 車賢錄\*\* · 金堯憲\*\*\*

(Byung-Chul Kim · Hyun-Rok Cha · Kwang-Heon Kim)

**Abstract** - A low frequency square wave electronic ballast for the high intensity discharge(HID) lamps using fuzzy logic controller is developed. This electronic ballast consists a buck converter, a low frequency square wave full bridge inverter, a high voltage pulse generator for the HID lamp ignition, an over current protection circuit and an 8-bit microcontroller. The ballast system is operated on the constant current mode during the HID lamp start-up process and the system is operated on the constant power mode during steady state. Experimental results show that the fuzzy logic control operation is carried out successfully by the 8-bit microcontroller PIC16F877. In this electronic ballast system, in spite of the limited control bandwidth caused by low operating speed of the microcontroller, the good performance in the constant lamp current characteristic is obtained. Acoustic resonance of the HID lamps can be effectively avoided because the instantaneous HID lamp power is fully constant due to the low frequency square wave drive.

**Key Words** : HID lamp, Electronic ballast, Microcontroller, Fuzzy logic control, Acoustic resonance

### 1. 서 론

메탈할라이드(Metal Halide; MH) 램프, 고압나트륨(High Pressure Sodium; HPS) 램프, 고압수은(High Pressure Mercury; HPM) 램프 등이 3가지의 고압방전등을 고휘도(High Intensity Discharge; HID) 방전등이라고 일컫는다.

이들의 특징은 고휘도, 고효율, 장수명이고 발광량에 비해 소형이며, 조명설계가 간편한 특징 등 많은 장점을 가지고 있어 근래 세계적 추세로 진행되고 있는 에너지 절약을 위한 고효율조명용 광원으로서 크게 주목받고 있다.

종래의 고효율, 대용량의 HID 램프는 조명효율을 증시하는 옥외조명용 광원으로서 주류를 이루고 있으며 그 외에도 어업선박용, 노광장치용 광원 등 특수 분야에도 활용되고 있다. 최근에는 고연색성을 지닌 콤팩트형 HID 램프가 개발되어 옥외 뿐 아니라 옥내조명용 광원, 정밀기기용 광원, 자동차 전조등용 광원 등으로도 널리 사용되게 되었다[1].

HID 램프용 안정기로서 현재에는 누설변압기를 주체로 한 자기식 안정기가 주류를 이루고 있으나, 이는 공급전력에 비해 부피가 크고 무거우며, 리액턴스 성분으로 인하여 역률이 나쁘고, 정전력 특성이 좋지 않으며, 코어와 권선의 전자기적인 응력에 의한 가청 소음을 수반하는 등의 결점이 있다. 또한 아크전압에 대한 전류의 비가 상대적으로 큰 HID

램프의 특성으로 인하여 효율이 낮아서 보통 80% 정도이며 고효율형이라고 할지라도 그 효율은 85% 정도이다. 따라서 자기식 HID 램프 안정기는 경량화와 고효율화를 증시하는 현대 조명 환경, 특히 옥내조명 분야에는 그리 적합하지 못하기 때문에 효율이 높고 점등이 안정되며 소형 경량인 HID 램프용 전자식안정기의 개발이 시급한 과제가 되고 있다. HID 램프의 시동 및 점등동작특성은 램프 전압, 램프 전류, 동작 주파수, 구동 파형 등 사용되는 전기적 조건에 민감하다. 또한 부의 임피던스 특성을 가진 전형적인 시변 비선형 소자로서 정확한 모델링에 의한 램프전력의 제어가 어렵고, 필스시동형의 경우에는 점등시동에 1.5~4.5 kV의 고전압을 필요로 한다. 또한 HID 램프는 점등 조건에 따라 음향공명현상이 발생하여 방전의 불안정을 초래하거나 혹은 램프의 파괴로 이어질 수 있어 이를 적극 방지하기 위한 대책이 필요하다.

음향공명현상은 HID 램프 점등 시스템의 설계 개발 시 극복해야할 중요한 과제이기 때문에 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있는데, 음향공명현상이 나타나지 않는 고주파 대역을 구하여 그 영역의 주파수로 구동하는 방식[2], 300 kHz 이상의 고주파로 점등하는 방식[3][4], HID 램프를 구동하는 주파수의 변조, 위상변조 등을 통하여 스위칭 패턴을 변화시키고 램프 전력의 스펙트럼 확산을 제어하여 각 고조파의 전력밀도가 최소화된 조건에서 HID 램프를 점등하는 방법[5][6], 고주파 구동주파수를 저주파로 진폭변조하여 HID 램프를 점등하는 방법[7], 500 Hz 이하의 저주파 구형파로 구동하는 방법[8] 등 다양한 방향에서 연구가 진행되고 있다.

이 중에서 특히 저주파 구형파 점등 방식은 HID 램프에 공급되는 전력의 시간적 맥동이 생기지 않기 때문에 음향공명 현상을 근본적으로 방지하고 안정된 점등을 실현하는 가

\* 正 會 員 : 朝鮮理工大學 電氣科 教授

\*\* 正 會 員 : 三省光州電子 硏究員

\*\*\* 正 會 員 : 全南大 工大 電氣工學科 및 RRC 副教授 · 工博

接受日字 : 2002年 5月 29日

最終完了 : 2002年 7月 22日

장 확실한 방법으로 인정되고 있다. 그래서 본 연구에서는 저주파 구형파 구동방식을 적용하였으며 구동주파수를 300 Hz로 하여 램프의 광출력에 프리커(flicker)를 초래하지 않고 음향공명을 방지하도록 하였다.

HID 램프는 방전관 및 외관의 기하학적 구조, 봉입물질의 종류와 량, 구동주파수, 구동파형, 한류소자의 종류와 특성 등 제반 요소들의 복합적인 영향에 따라 예측하기 어려운 비선형시변(Nonlinear Time Varying System) 특성을 나타내어 시스템의 모델링이 매우 난해하며 애써 모델링을 행하여도 오차가 커질 수 있다. 따라서 이와 같은 시스템의 제어에는 엄밀한 수학적 모델링을 요하지 않고 숙련된 전문가의 경험적 언어변수로 제어규칙을 세울 수 있는 퍼지논리 제어(Fuzzy Logic Control)가 적합한 제어기법이 될 수 있다[9]. 본 연구에서는 HID 램프 전류 및 전력제어에 퍼지논리제어를 적용하여 입력전압 변동이나 HID 램프의 특성 변동에 대해서도 램프의 전력이 안정되고 음향공명현상이 없는 퍼지제어 안정기의 구현을 시도하였다.

일반적으로 조명용 램프의 전자식안정기는 고효율화, 소형경량화 및 경비절감 등을 우선시하여 설계되고 개발되는데 비해 실시간 퍼지제어기를 구현하기 위해서는 고성능이면서 고가인 DSP 보드 및 고속의 A/D, D/A 변환회로 혹은 퍼지 전용의 하드웨어 등 복잡한 주변회로를 요하기 때문에 퍼지제어기를 적용하여 HID 램프용 안정기를 개발하는데 있어 문제점이 되고 있다. 이러한 문제점의 극복을 위하여 본 연구에서는 PIC계열 범용 고기능 8-bit 마이크로컨트롤러의 플래쉬 롬(Flash ROM) 버전인 PIC16F877을 이용하여 퍼지제어기 알고리즘을 구현하도록 연구하였고 구현된 퍼지 로직제어를 통해 HID 램프의 정전류 및 정전력제어가 안정되게 행해질 수 있도록 하였다.

## 2. 안정기 회로의 구성과 동작

### 2.1 제안한 안정기 회로 시스템의 구성

그림 1은 본 연구에서 제안한 2주파수 구동 방식의 HID 램프용 퍼지제어 전자식안정기 회로 전체구성을 나타낸 것이다.

형광등이나 HID 램프용 전자식 안정기에서 역률개선회로(Power Factor Correction ; PFC)는 보통 부스트 컨버터를 기본으로 한 액티브형 PFC 회로가 잘 이용되고 있다.

이 경우 PFC 회로의 DC bus 전압출력은 대개 380~400 V가 출력되지만 본 연구에서는 그림 1에 나타낸 바와 같이 경비절감과 EMI 측면에서 유리하고 고조파 저감기능을 겸하는 수동형 L, C 필터 방식의 PFC 회로를 사용하였으므로 안정기의 DC 입력전압은 AC220V를 정류하여 얻어진 DC300V가 되고 L, C형 PFC 회로를 거쳐 그대로 벽 컨버터 부에 공급된다.

그림 1에서  $S_0$ 와  $L_0$ ,  $C_0$ ,  $D_0$ 들은 벽 컨버터 회로를 구성하고 있다.

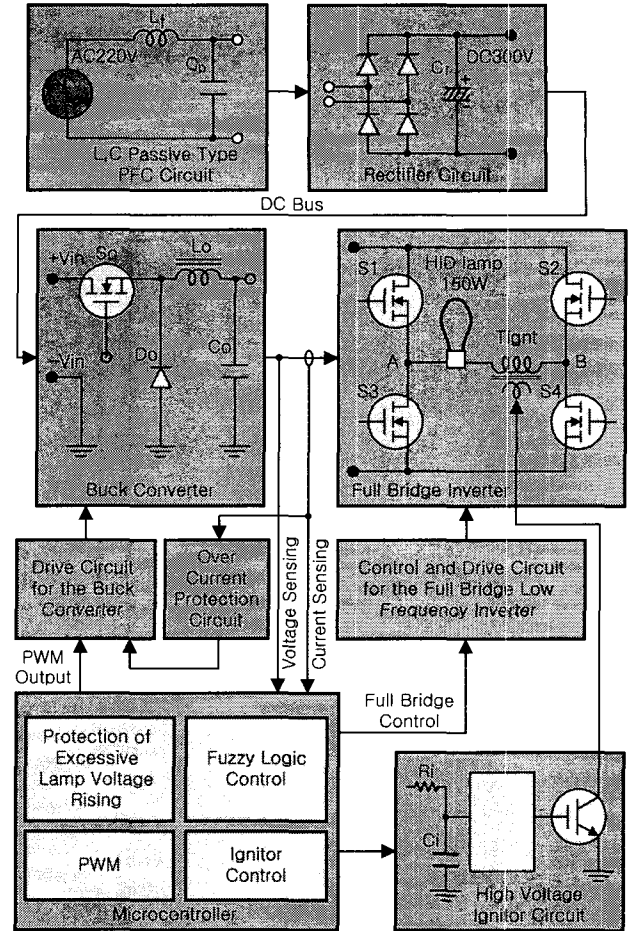


그림 1 HID 램프용 퍼지제어 전자식 안정기의 구성도  
Fig. 1 Block diagram of the fuzzy logic controlled electronic ballast for HID lamps

벽 컨버터부에서는  $S_0$ 의 PWM 스위칭 제어에 의해 램프를 정전류 혹은 정전력으로 제어하며 램프의 점등동정특성에 맞추어 적절한 출력전압을 공급하는 중요한 역할을 하고 있다.

마이크로컨트롤러에서는 퍼지제어 알고리즘 계산을 수행하여 PWM 제어신호를 출력하며, 풀브리지 인버터의 제어신호 및 이그나이터 제어신호도 출력한다.

또한 HID 램프는 수명말기에 램프 전압이 과도 상승하는 경향이 있는데 이 경우 마이크로컨트롤러는 센싱된 램프전압이 설정된 상한선을 넘어서면 안정기를 차단시켜 램프 및 안정기 시스템을 보호한다.

HID 램프를 dc로 점등하면 발광관 내의 금속할로겐화물, 나트륨 등이 음극 쪽으로 이동하여 충전 가스의 분리현상을 초래하고 램프가 발광에 부적당한 상태로 변할 수 있다.

또한 HID 램프의 dc 점등은 램프 전극 중의 음극을 빨리 소모시켜 램프의 수명을 현저히 단축시킨다. 그러므로 벽 컨버터 다음 단계 풀 브리지 인버터부를 두고 여기에서 램프에 인가되는 전원의 극성을 주기적으로 바꾸어 주도록 하여 램프에 공급되는 dc 성분이 거의 영이 되도록 하고 있다.  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$ 로 구성된 저주파 구형파 풀 브리지 인

버터부는 전류제한 기능이나 전력제어 기능은 부여하지 않고 단지 램프의 전압 및 전류의 극성을 약 3.3ms 정도의 주기로 전환시키는 작용을 한다. 풀 브리지의 구형과 출력 주파수는 HID 램프의 음향공명현상을 피하기 위하여 1 kHz 이하로 할 필요가 있으나 너무 낮으면 램프 광속의 깜박임 (flicker)을 초래할 수 있으므로 적어도 100 Hz 이상으로 선정해야 한다. 본 연구에서는 이 주파수를 300 Hz로 선정하였다.

HID 램프를 구형과 점등할 때 저주파 순수구형파에 고주파 리플 성분을 첨가해주면 HID 램프 전극의 온도분포 불균일을 방지하고 전극 선단부의 온도를 균일하게 해주는 효과가 있어 램프 수명을 길게 해주며 더욱 안정된 아크방전을 실현할 수 있게 된다[10]. 그러므로 벽 컨버터부에서는 출력파형에 의도적으로 적절한 리플이 첨가되도록  $L_0$ ,  $C_0$  값을 선정하여 다음 단인 풀브리지 인버터부를 통해 램프에 공급되는 전압 전류 파형은 저주파 순수구형파에 약 10% 정도의 고주파 리플 성분이 첨가된 고주파변조 구형파로 된다.

인버터 A, B점의 저주파의 구형과 출력은 이그나이터 트랜스를 거쳐 HID 램프에 전력을 공급한다. HID 램프의 순시 전류와 전압은 각각 센싱된 후 적절한 배율로 조절하여 마이크로컨트롤러에 공급된다. 입력된 램프전압 및 전류값에 따라 마이크로컨트롤러는 제어모드를 판별하고 퍼지제어 알고리즘에 의해 정전류 혹은 정전력 PWM 제어를 실행한다.

2.2 HID 램프의 전류 및 전력제어모드

그림 2는 본 연구에서 제안한 램프 전류 및 전력의 제어모드를 나타내고 있다.

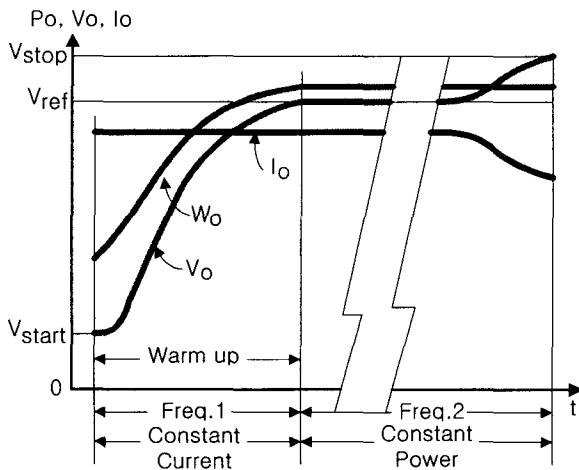


그림 2 HID 램프의 전류 및 전력제어모드  
Fig. 2 Current and power control mode of HID lamps

램프의 전류 및 전압을 마이크로컨트롤러의 매 샘플링 주기마다 센싱하여 센싱된 램프의 전압이 설정치 이하이면 마이크로컨트롤러는 정전류 퍼지제어를 실행하며 램프의 전압이 설정치 이상이면 정전력 퍼지제어를 실행한다.

그림 2에서 HID 램프가 시동 직후 워밍업 구간에서는 램프

양단의 전압이 15 V 정도의 낮은 상태에서 서서히 상승해간다. 이 상태에서 정전력제어를 행하면 램프전압이 낮기 때문에 큰 전류가 흘러서 스위칭 소자나 출력필터 인덕터의 스트레스가 커지며 램프에 흐르는 전류가 정격치를 크게 초과하게 되어 램프를 열화 시키고 수명이 단축되며 연색성이 변화되는 등의 좋지 않은 결과를 초래하게 된다.

따라서 이 구간에서는 램프에 흐르는 전류가 정전류가 되도록 제어한다. 또한 램프의 전압이 낮으므로 벽 컨버터의 출력전압도 낮다. 램프가 워밍업 과정을 거쳐 정상점등상태에 이르면 램프 전압은 높아지고 벽 컨버터의 출력전압도 높아진다.

HID 램프 양단 전압이 상승하여 정상점등구간에 접어들면 마이크로컨트롤러는 램프 전류를 램프전압에 상응한 값으로 감소시켜 램프에 정전력이 공급되도록 제어한다. 결과적으로 전원전압의 변동이나 램프의 에이징(aging)에 의한 램프전압상승의 경우에도 과잉의 전력이 공급되는 일이 없이 안정된 램프 점등을 실현할 수 있게 된다.

HID 램프는 장시간 사용하면 점등 중 램프 전압이 서서히 상승하는 경향이 있고 그 중에서도 특히 고압나트륨 (High Pressure Sodium ; HPS) 램프는 특히 그러한 경향이 크다. HID 램프를 정전력제어하는 경우 램프 수명말기에 램프 전압이 지나치게 상승하면 램프 전류가 극단적으로 줄어들어 램프가 점등을 유지하지 못하고 소등된다. 소등된 후 램프가 냉각되면 재점등되고 얼마 후 다시 램프전압이 극단적으로 상승하여 소등되는 이른바 사이클링(cycling) 점등을 반복하게 된다. 이 경우 램프전압의 비정상적인 상승이 센싱되면 마이크로컨트롤러는 안정기를 차단시키므로 사이클링 점등을 방지하고 점등시스템도 보호된다.

3. 퍼지제어기의 설계

퍼지제어 알고리즘 : 그림 3은 퍼지로지 제어부의 구성을 나타낸 블록다이어그램이다. 마이크로컨트롤러는 HID 램프전압과 전류를 센싱하고 내장된 AD변환기에서 디지털 값으로 변환된 샘플링 데이터를 사용하여 퍼지제어 로직의 입력력을 생성한다. 이 때 램프전압(0~300 V) 및 전류 (0~3.0 A)는 0~255의 8-bit 코드값으로 변환된다.

HID 램프의 시동직후부터 워밍업 점등 과정에서 안정기는 정전류제어를 행하므로 이 구간에서 k 번째 샘플링에서의 오차  $e(k)$ 는 다음의 식으로 계산된다.

$$e(k) = I_{ref} - I_{\alpha(k)} \tag{1}$$

여기서,  $I_{ref}$  : 전류기준치,  $I_{\alpha(k)}$  : 샘플링된 램프전류이다.

워밍업 점등 과정을 거쳐 HID 램프가 정상 점등된 상태에서는 안정기 시스템은 정전력제어를 진행하므로 이 때의 오차  $e(k)$ 는 다음과 같이 된다.

$$e(k) = W_{ref} - W_{\alpha(k)} \tag{2}$$

여기서,  $W_{ref}$  : 전력기준치,  $W_{\alpha(k)}$  : 샘플링된 램프전력이다.

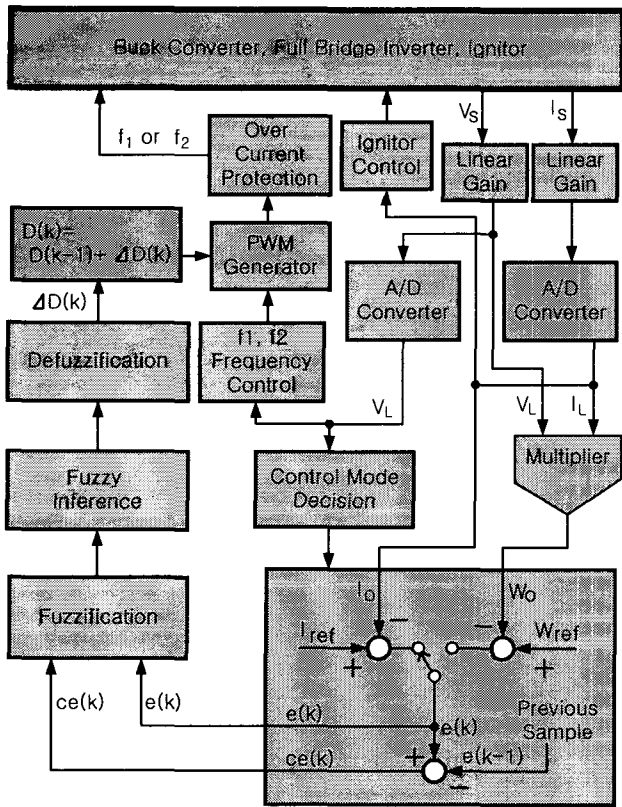


그림 3 퍼지제어의 구성도  
Fig. 3 Fuzzy logic control scheme

한편,  $k$  번째 샘플링에서의 오차변화  $ce(k)$  는 다음과 같이 표현된다.

$$ce(k) = e(k) - e(k-1) \tag{3}$$

퍼지제어 알고리즘은 퍼지화, 퍼지규칙추론, 비퍼지화의 3 부분으로 나눌 수 있다.

퍼지화(fuzzification)는 샘플링된 입력 값을 적당한 언어적인 변수값 혹은 퍼지집합(fuzzy set)으로 입력데이터를 분류하는 단계이며, 퍼지규칙추론(fuzzy rule inference) 단계는 제어규칙과 언어적인 변수 정의에서 지시된 대로 퍼지제어 작용을 추론하는 단계이며, 비퍼지화(defuzzification) 단계는 추론된 퍼지제어 작용을 크리쉬(crisp) 값으로 계산하여 출력하는 단계이다. 퍼지제어 알고리즘에서 최종 출력형태는 매 연산 사이클마다 퍼지 처리 루프에서 듀티사이클의 변화분  $\Delta d(k)$  의 값으로 출력된다.

$k$  번째 샘플링에서 듀티사이클 출력값  $d(k)$  는 직전 연산 루프의 듀티사이클 출력값에  $k$  번째 연산 사이클의 듀티사이클 변화분  $\Delta d(k)$  를 더하여 계산되며 다음과 같이 된다.

$$d(k) = d(k-1) + \Delta d(k) \tag{4}$$

이 듀티사이클 출력값은 벡 컨버터의 PWM 제어 스위치  $S_o$  에 공급되고 마이크로컨트롤러가 판단한 제어모드에 따

라 램프를 정전류 혹은 정전력모드로 제어하게 된다.

**퍼지화** : 샘플링된 입력값의 퍼지화를 위하여 5개의 퍼지 집합들로 구성하였으며 오차  $e$ 와 오차의 변화  $ce$ 에 대한 언어적 변수값들은 NB(Negative Big), NS(Negative Small), ZE(Zero Equal), PS(Positive Small), PB(Positive Big)로 정의하였다. 이 퍼지 레벨의 수를 증가시키면 입력 샘플링 값의 보다 세밀한 퍼지화가 가능하여 입력해상도를 증가시킬 수 있지만, 마이크로컨트롤러의 계산부담을 증가시키므로 여기서는 일단 5개의 퍼지 레벨로 정의하였다. 오차 ( $e$ )와 오차의 변화 ( $ce$ )는 (-)의 값을 가질 수 있으며 퍼지소속함수에서는  $-1 \sim +1$ 로 정규화하였다.

퍼지집합의 소속함수는 삼각형의 표준형 퍼지 소속함수를 사용하여 그림 4와 같이 정의하였다.

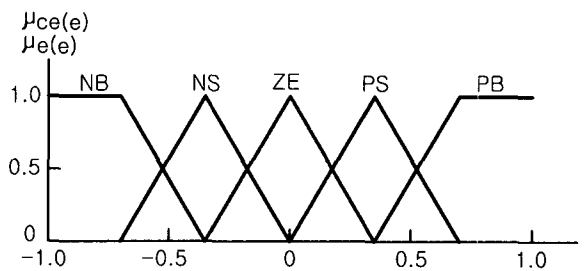


그림 4 오차(e)와 오차변화(ce)의 소속함수  
Fig. 4 Membership functions of error(e) and change in error(ce)

오차  $e$ 와 오차변화  $ce$ 의 양자화된 값들의 퍼지표현이 바로 퍼지집합(fuzzy sets)들이 된다.

기본변수영역이  $x_1 \leq x_i \leq x_n (i=1 \dots n)$ ,  $\mu_i \in [0, 1]$ 일 때 소속함수는 점  $P(x_i, \mu_i)$ 의 집합으로 정의되며 그들의 소속도  $\mu$ 의 계산을 위해서는 빠른 승제산 기능을 필요로 한다.

마이크로컨트롤러를 이용한 퍼지화 과정의 코딩에서는 룩업 테이블을 구성하여 참조하게 할 수도 있으나 코드의 크기가 커지며 대부분의 16-bit 혹은 16-bit에 필적하는 강력한 8-bit 마이크로컨트롤러에서는 계산속도에서 얻어지는 상대적인 이득은 그리 크지 않으면서 큰 용량의 ROM을 필요로 하게 된다.

그러므로 여기서는 마이크로컨트롤러가 빠른 승제산 능력을 가지고 있지 않는 점을 보완하여 소스 코드의 크기를 줄이고 계산시간을 단축시키기 위하여 소속도를 계산에 그림 5와 같은 신속계산 방법을 사용하였다.

이 방법은 그림 5와 같이 퍼지입력의 기본변수영역을  $-1 \sim 0 \sim +1$ 로 정규화 했을 때, 두 개의 지정된 점  $x_1, x_2$ 와 두 개의 고정된 정수값을 가진 기울기  $s_1, s_2$  만을 이용하여 소속도  $\mu$ 를 다음과 같이 계산한다.

case 1:  $X \leq x_1$  일 때  $\mu = 0$

case 2:  $x_1 \leq X \leq x_2$  일 때  $\mu = \min(1, (X - x_1) \times s_1)$

case 3:  $x_2 \leq X$  일 때  $\mu = \max(0, 1 - (X - x_2) \times s_2)$

여기서  $X$ 는 현재의 퍼지 입력값( $X \in [x_1 \dots x_n]$ )이다.

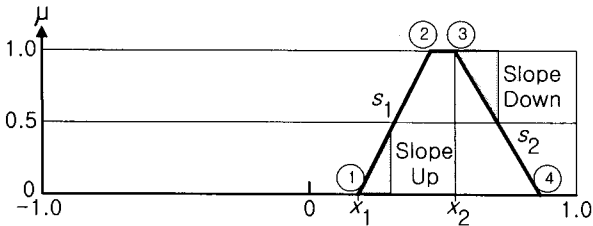


그림 5 소속도의 계산  
Fig. 5 Calculation of the membership degree

**퍼지규칙추론** : 퍼지입력과 퍼지제어규칙으로부터 제어량의 퍼지값을 계산하는 과정이 퍼지규칙추론이다.

표 1 퍼지제어 추론규칙  
Table 1 Fuzzy control inference rules

e \ ce	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZE
NS	NB	NB	NS	ZE	PS
ZE	NB	NS	ZE	PS	PB
PS	NS	ZE	PS	PB	PB
PB	ZE	PS	PB	PB	PB

퍼지입력에 대한 퍼지 출력과 연관된 제어규칙은 제어시스템 특성에 대한 일반적인 지식과 경험 및 제어되는 프로세스에 대한 직관적인 감각과 시행착오를 거쳐 얻어진다.

HID 램프 제어용 벽 컨버터의 특성 실험을 거쳐 표 1과 같은 25개의 퍼지제어 추론규칙을 만들었다.

표 1의 추론규칙으로부터 제어기의 퍼지알고리즘  $R_i$ 는 다음과 같이 "IF~THEN~"의 규칙으로 정형화된다.

- $R_1 : IF (e) \text{ is } NB \text{ AND } (ce) \text{ is } NB \text{ THEN } (\Delta d) \text{ is } NB$
- $R_2 : IF (e) \text{ is } NB \text{ AND } (ce) \text{ is } NS \text{ THEN } (\Delta d) \text{ is } NB$
- ⋮
- $R_{25} : IF (e) \text{ is } PB \text{ AND } (ce) \text{ is } PB \text{ THEN } (\Delta d) \text{ is } PB$

임의의 샘플링 루프에서 계산된  $e$ 와  $ce$ 는 적어도 두 개의 퍼지집합에 속하기 때문에  $(e, ce)$ 의 어느 조합에서도 4개의 퍼지제어 추론규칙이 적용되며 나머지 규칙에 대한 소속함수의 추론값은 소속도가 영(0)이므로 영으로 된다.

25개의 제어규칙 중에서  $i$ 번째 제어규칙  $R_i$ 의 적합도(Degree of Fulfillment ; DOF)  $w_i$ 는 Mamdani의 "min" 합 연산자를 이용하여 다음의 식으로 표현된다.

$$w_i = \min\{\mu_e(e), \mu_{ce}(ce)\} \tag{5}$$

**비퍼지화** : 출력 소속함수들은 비퍼지화 과정을 거쳐 크리슈 값으로 변환된다. 비퍼지화 과정에서는 보통 한 개 이상의 퍼지출력이 유효한 것으로 추론되므로 이들 서로 상이

한 퍼지출력 결과값들을 절충시켜 합성된 단일의 크리슈 값으로 만들어야 한다. 일반적인 퍼지제어의 경우 비퍼지화 과정에서는 COA(Center of Area) 및 COG(Center of Gravity) 방법을 널리 사용하고 있으나 본 연구에서는 마이크로컨트롤러의 계산시간 단축을 위해 근사 COA법인 COM(Center of Maximum)법을 이용하여 비퍼지화 하였다. COM 비퍼지화법에 의한 크리슈 출력값  $Y$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$Y = \frac{\sum_j (\mu_{RESULT, TERMj} \times Y_j)}{\sum_j \mu_{RESULT, TERMj}} \tag{6}$$

여기서  $Y_j$  : 언어적 출력변수의 최대치,

$\mu_{RESULT, TERMj}$  : 각 출력항의 추론된 적합도이다.

**PWM 값의 출력** : 마이크로컨트롤러의 퍼지제어 알고리즘의 구현에서 비퍼지화 과정을 거쳐 얻어진 크리슈 출력값은 최종적인 듀티사이클이 아니고 매 연산 루프에서의 듀티사이클 변화분에 해당되는 출력이다.

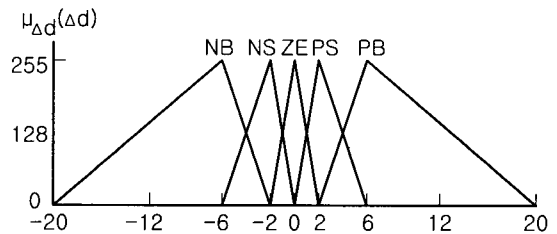


그림 6 Δd의 소속함수  
Fig. 6 Membership functions for the Δd

듀티사이클 변화분  $\Delta d$ (출력 퍼지집합)에 대한 퍼지집합의 소속함수는 그림 6에 나타난 바와 같이 NB, NS, ZE, PS, PB의 5개로 구성하였다.  $\Delta d$  소속함수의 정규화된 스케일은 그림 6에 나타난 바와 같이 -20~0~20으로 설정하였고 이에 상응하는 마이크로컨트롤러의 실제 코드출력값은 0~20~40으로 하였다. 따라서 매 연산주기마다의 듀티사이클 변화분은  $\Delta d$ 의 마이크로컨트롤러 코드출력값에서 20을 감산하면 되고 마이크로컨트롤러의 계산부담은 줄어들게 된다. 이렇게 얻어진 값을 이전의 듀티사이클에 더하여서 새로운 PWM 듀티사이클 값을 계산한다. 즉,

$d(k) = d(k-1) + (\Delta d(k) - 20)$ 이 되고 8-bit(듀티사이클 0에서 100%까지 256 이산값)의 분해능을 가진 PWM 파형으로 출력된다.

#### 4. 실험 결과

실험한 퍼지제어 HID 램프 안정기시스템 회로는 그림 1에 나타난 바와 같다. 주요 구성부분들은 보조전원부, 벽 컨버터부, 퍼지로직 제어 구현 및 시스템 전체 제어를 위한 마이크로컨트롤러부, 과전류보호회로부, 풀브리지 인버터부, 이그나이터부 등이다.

실험에 사용한 HID 램프는 MH 램프로서 Philips의 CDM-T 150W/942와 Osram의 HQI-T 150W/NDL Pro를 사

용하였고, HPS 램프로서는 NH150을 사용하였다.

퍼지논리제어 알고리즘을 구현하기 위한 마이크로컨트롤러에는 PIC 계열의 플래쉬 ROM형 8-bit 마이크로컨트롤러인 PIC16F877을 사용하였다. 이는 8kB의 충분한 플래쉬 프로그램 메모리 영역과, 368×8B의 데이터메모리(RAM), 256×8B의 EEPROM 데이터, 20MHz의 클럭에서 명령어 사이클당 200ns의 빠른 처리속도, 14 source까지의 인터럽트 능력, 10-bit 8ch의 AD변환기 내장, 최대해상도 10-bit인 2개의 PWM 모듈 등 충분한 능력을 구비하고 있다.

마이크로컨트롤러가 1회 사이클을 수행하는 데 소요되는 시간은 HID 램프전압 및 전류의 AD변환을 이용한 샘플링 시간, 이그나이터 제어신호의 출력, 비정상적인 램프전압 상승 검출, 제어모드의 결정, 25개의 퍼지규칙에 대한 제어 알고리즘의 계산, 새로운 듀티사이클의 계산, PWM 출력 등을 포함하여 실효결과 평균 970μs 정도가 소요되었다. 따라서 샘플링 주기는 약간 여유를 주어 1024μs가 되도록 프로그램 하였다.

그림 7은 이그나이터 회로에서 출력되는 고압 버스트 펄스 파형을 관측한 것이다. 그림 7(a)에 나타낸 바와 같이 펄스전압의 크기가 약 4.8kV(peak)인 고압 펄스가 약 720μs 간격으로 연속적으로 발생되도록 하였다.

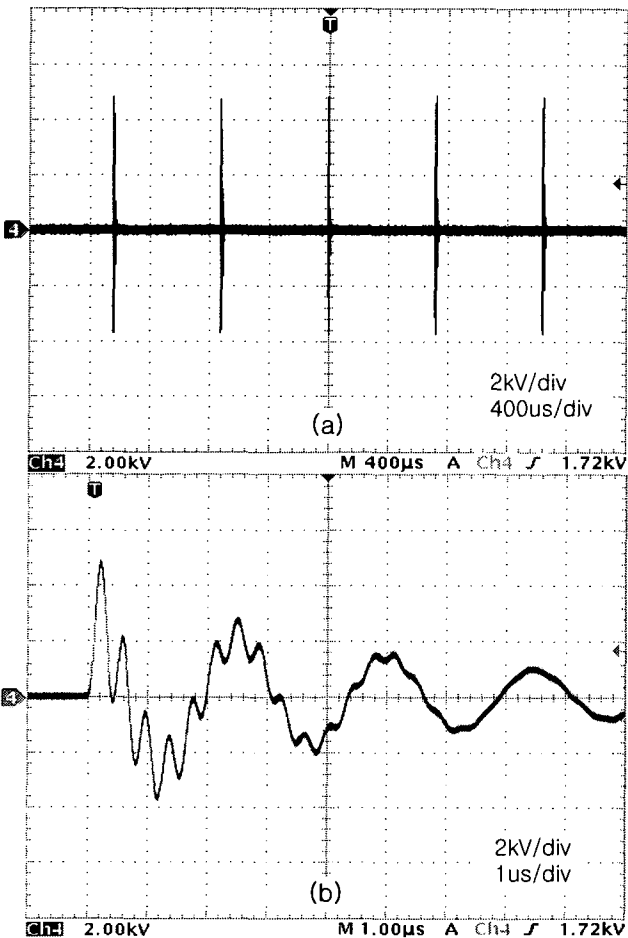


그림 7 이그나이터 회로의 고압 버스트 펄스 파형  
Fig. 7 High voltage burst pulse waveforms of the ignitor circuit

그림 7(b)는 고압 버스트 펄스 1개를 시간 축으로 확대하여 관측한 것인데 수평 중심선에서 상하로 감쇄 진동하는 펄스 형태로 되어 있다. 첫 번째 상승 펄스는 크기가 약 4.8 kV, 펄스 폭이 약 0.4μs 정도가 얻어지고 있다. 이 경우 펄스의 폭은 일반적으로 HID 램프의 펄스 시동에 필요하다고 알려진 1μs 보다는 적은 값이지만, 두 번째 상승 펄스는 크기가 2kV 정도이고 펄스 폭이 1μs가 얻어지고 있으며 펄스의 반복율이 1.4 kp/s 정도로 높기 때문에 실제로 펄스 시동형 MH 램프나 HPS 램프 어느 것에서도 확실하고 신속한 시동이 가능하였다. 램프가 일단 점등되면 마이크로컨트롤러는 이그나이터 제어신호를 즉시 차단하여 램프를 보호하고 램프의 수명에 미치는 영향을 최소화하도록 하였다. HID 램프의 점등시동에 미치는 펄스의 폭과 펄스반복율과의 상관관계에 대해서는 향후 더 정밀한 연구가 필요하다고 본다.

그림 8은 벽 컨버터부의 PWM 출력 전압파형과 출력 필터 인덕터  $L_0$ 에 흐르는 전류파형을 관측한 것이다.

벽 컨버터는 거의 연속도통모드와 불연속도통모드의 임계점에서 동작하고 있음을 보여주고 있다.

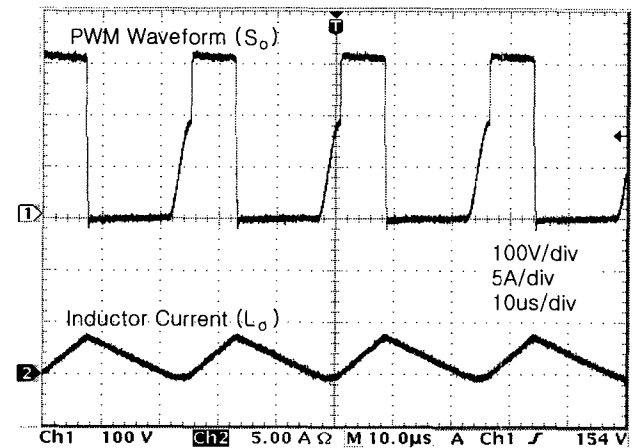


그림 8 PWM 스위칭 파형과 인덕터 전류파형  
Fig. 8 PWM switching waveform and the inductor current waveform

실험에 사용한 8-bit 마이크로컨트롤러의 연산 처리 속도 한계로 인하여 다량의 계산을 요하는 퍼지논리 제어 알고리즘을 처리하는데 상당한 시간이 소요되므로 샘플링 주기가 길어져서 1024μs가 되었다. 이 경우 시스템 루프 이득의 제어 대역폭은 50~100 Hz로 매우 좁게 된다. 그런데 HID 램프는 점등된 후 워업 과정에서 아크 발광관이 거의 단락 상태에 가까운 물리적 특성을 나타내며 완전한 정상점등상태에 도달하면 저항성 부하와 유사한 특성으로 변한다.

이와 같은 HID 램프 부하의 물리적 특성상 점등 워업 과정의 정전류제어모드에서는 대역폭의 한계로 인하여 다소 불안정한 제어특성이 나타남을 알 수 있었다. 이 점을 해결하기 위해서는 점등 워업 과정 중 시스템의 과도응답특성이 좋아야 한다. 정전류제어용 벽 컨버터의 출력필터 인덕터 값은 일정하므로 PWM 스위칭주파수 만을 낮추면 시스템 루프 이득의 위상여유가 증가한다. 제어시스템에서 위상여

유가 증가되면 오버슈트나 링킹이 감소하면서 과도응답특성이 개선된다[11].

그러므로 워업 점등 구간에서는 벡 컨버터의 PWM 구동 주파수를 정상점등시보다 낮은 값인 19.53 kHz로 하여 시스템의 위상여유를 증가시키고 램프가 정상점등상태에 가까워지면 39 kHz로 하여 벡 컨버터를 정상적인 연속모드 동작으로 회복시키는 2주파수 구동방식을 사용하였다. 2주파수 구동 방식을 통해서 제어계의 대역폭 좁음에 기인한 HID 램프 점등 워밍업 과정의 불안정 문제를 해결하고 안정된 정전류제어를 실현할 수 있었다.

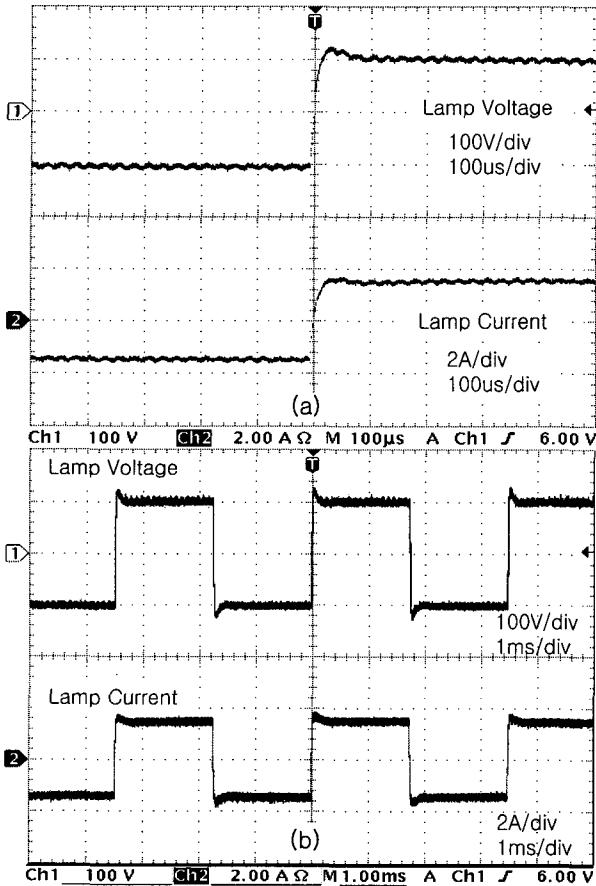
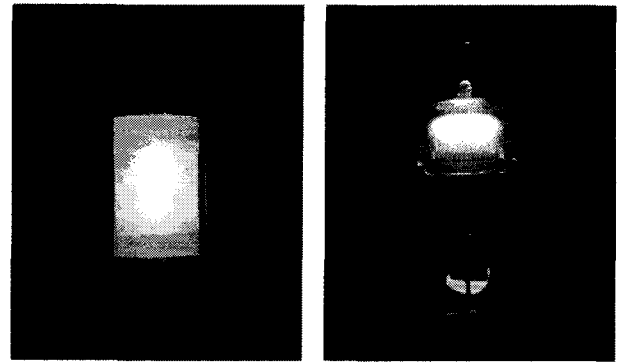


그림 9 MH 램프의 전압 및 전류파형  
Fig. 9 Waveforms of the MH lamp voltage and current

그림 9(a)는 램프 전류파형을 수평축으로 확대한 것인데 약 10% 정도 리플률로 고주파 변조된 파형의 전류가 램프에 공급되고 있음을 확인할 수 있다. 이 때 벡 컨버터의 출력필터 인덕터 값은 400  $\mu$ H이며 출력 필터 캐패시터  $C_o$ 의 값은 2  $\mu$ F로 인해 HID 램프 측에서 본 전류리플률은 단순히  $L_o$ ,  $C_o$  값만으로 정해지는 것이 아니고 HID 램프에 직렬로 접속된 이그나이터용 펄스트랜스 2차측 권선의 인덕턴스가 램프전류에 대하여 어느 정도 필터링의 역할을 해주고 있기 때문에 전류리플률에 영향을 미치고 있다.

그림 10은 2종류의 MH 램프에 대하여 점등 중 아크 상태를 관측한 것인데 어느 램프에서도 음향공명현상은 발생

하지 않고 안정된 아크 방전이 이루어지고 있음을 알 수 있었다.



(a) CDM-T150W/942 (b) HQI-T 150W/NDL

그림 10 MH 램프의 아크 상태  
Fig. 10 Arc shape of MH lamps

그림 11은 HID 램프 중에서 HPS를 점등 했을 때 음향공명현상의 발생 유무 및 방전의 안정을 확인하기 위하여 MH 램프에 비하여 발광관(직경 6mm, 길이 80mm)이 긴 HPS 램프(NH150, 150W형)를 점등 시켜 그 아크 상태를 관측한 것이다.

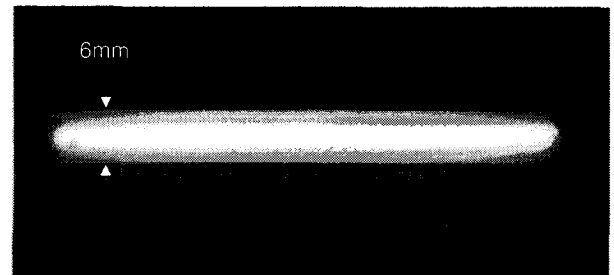


그림 11 HPS 램프의 아크상태(NH150)  
Fig. 11 Arc shape of the HPS lamp(NH150)

MH 램프의 경우와 마찬가지로 음향공명 현상은 전혀 발생하지 않으며 아크가 안정되어 양호한 발광상태를 관측할 수 있었다. MH 램프나 HPS 램프 어느 것에서도 음향공명 현상은 전혀 나타나지 않고 전원전압의 변동에 대해서도 아크상태는 매우 안정되며 가시적인 플리커 현상이 생기지 않는 안정된 발광특성을 나타내었다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 경제성 있고 음향공명현상이 전혀 없는 HID 램프 범용의 퍼지제어 전자식 안정기 개발을 목표로 하였다. 따라서 상대적으로 고가인 DSP 보드나 퍼지전용의 특수 하드웨어를 사용하지 않고 8-bit 마이크로컨트롤러인 PIC16F877을 이용하여 퍼지논리 제어기의 알고리즘을 구현할 수 있도록 연구하였다. 구현된 퍼지제어기를 HID 램프의 정전류 및 정전력제어에 적용하였으며 램프의 PWM 제어에

는 벡형 dc-dc 컨버터를 사용하였다.

8-bit 마이크로컨트롤러의 상대적으로 낮은 처리속도로 인하여 샘플링주기가 길어지고 제어계의 대역폭이 좁아져서 생기는 램프 워업 과정 중의 제어의 불안정은 워업 과정과 정상점등 구간의 PWM 주파수를 달리한 2 주파수 구동방식으로 보완하여 안정된 정전류 및 정전력제어를 실현할 수 있었다.

300 Hz의 저주파 순수구형파에 약 10% 정도의 리플율이 되도록 고주파 성분으로 변조시킨 구형파로 HID 램프를 점등하여 MH 램프나 HPS 램프 어느 것에서도 램프 아크에 음향공명현상이 전혀 발생하지 않았고 안정된 점등을 실현할 수 있었다.

HID 램프를 퍼지논리제어에 의해 정전류, 정전력제어하며, 마이크로컨트롤러에 의해 시동제어 및 램프전압 과잉상승 등 동정특성 변화에 대응하도록 하였으므로 MH 램프 및 HPS 램프에서 하드웨어나 소프트웨어에 수정을 가하지 않고 램프를 안정되게 잘 점등할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

[1] S. A. Mucklejohn, and B. Preston, "Developments in Low Wattage High Intensity Discharge Lamps", Proc. of the 2000 IEEE Ind. Appl. Meeting Vol. 5, pp. 3326-3329, 2000.

[2] 김기정, "고효율 펄스스타트 메탈헬라이드 램프 (MH200W)의 음향공명현상 감소", 조명·전기설비학회 논문지, 제15권 제6호, pp.8-14, 2001.

[3] Michael Gulko and Sam Ben-Yaakov, "A MHz Electronic Ballast for Automotive-Type HID lamps", IEEE PESC-97 St. Louis, pp. 39-45, 1997.

[4] Ryo Shmotaya, et al., "A Novel High-frequency Electronic Ballast with momentary re-dischargeable Ignitor for HID Lamp", Proc. of the 2001 IEEE 32nd Annual PESC, Vol. 1, pp. 151-157, 2001.

[5] 이성희, 이치환, 권우현, "HID 램프용 공진형 전자식 안정기", 전기학회논문지, 제50B권, 제10호 pp. 530-535, 2001.

[6] Laszlo laski, Prasad Enjeti, Ira J. Pitel, "White-Noise Modulation of High-Frequency High-Intensity Discharge Lamp Ballasts", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 34 No. 3, pp. 597-605, 1998.

[7] 이치환, "진폭변조에 의한 메탈헬라이드 램프의 음향공명 감소", 조명·전기설비학회논문지, 제14권 제5호, pp. 43-49, 2000.

[8] 이인규, 최성진, 이규찬, 조보형, "자동차 헤드라이트용 고압 방전등 안정기 시스템의 모델링 및 제어기 설계", 전기학회논문지, 제49B권 제8호, pp. 545-550, 2000.

[9] Tarun Gupta, R. R. Boudreaux, R. M. Nelms and John Y. Hung, "Implementation of a Fuzzy Controller for DC-DC Converters Using an Inexpensive 8-bit Microcontroller", IEEE Trans. on Ind. Elect., Vol. 44, No. 5, October 1997.

[10] 박종연, 박영길, 정동열, 김한수, "250W MHL용 Buck Type 전자식 안정기 및 Dimming 시스템 거발", 전력 전자학회논문지, 제7권 제1호, pp. 30-40, 2002.

[11] Robert W. Erickson and Dragan Maksimović, "Fundamentals of Power Electronics", 2nd ed. Kluwer Academic Publishers, pp.333-334, 2001.

## 저 자 소 개



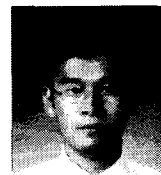
### 김 병 철(金柄哲)

1952년 7월 15일 생. 1975년 조선대 전기 공학과 졸업. 1983년 조선대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 2000년 전남대 대학원 전기공학과 박사수료. 현재 조선이공대학 전기과 교수

Tel : 062-230-8393

Fax : 062-233-1135

E-mail : bckim@mail.chosun-c.ac.kr



### 차 현 록(車賢錄)

1974년 4월 25일생. 1998년 전남대 공대 화학공학과 졸업(학사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 전력 전자학회 우수논문상 수상. 현재 삼성광주전자 연구원

Tel : 062-970-5223

E-mail : hrcha@samsung.co.kr



### 김 광 헌(金堯憲)

1960년 12월 27일 생. 1983년 전남대 계측제어공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전남대 공대 전기공학과 및 RRC 부교수

Tel : 062-530-1747

E-mail : khk@chonnam.ac.kr