

## 고출력 MHL용 구형저주파 구동 방식의 전자식 안정기 설계

金基南<sup>†</sup>, 朴鐘演<sup>\*</sup>, 崔榮敏<sup>\*\*</sup>

### Electronic Ballast Design Driven by Low Frequency Square Wave for High Power MHL

Ki-Nam Kim, Jong-Yun Park, and Young-Min Choi

#### 요 약

본 논문에서는 Buck Converter 동작 원리를 Full-Bridge Inverter에 적용한 전자식 안정기를 제안하였다. 전자식 안정기는 EMI 필터, 수동 PFC, Full-Bridge Inverter로 2-stage로 구성되어 있다. PFC는 신뢰성 확보를 위해 수동 PFC를 사용하였다. Full-Bridge Inverter는 High Side와 Low Side 스위치의 구동 주파수를 각각 고주파와 저주파로 구동하여 Buck Converter의 동작을 구현 하였다. 램프를 저주파수 구형파로 구동하여 음향공명현상을 피하게 되었으며, 고주파수 스위칭으로 인덕터의 부피를 줄였다. 제안한 방법은 시뮬레이션과 실험을 통해 증명하였다.

#### ABSTRACT

In this paper, We proposed electronic ballast that applies Buck Converter operation principle to Full-Bridge inverter. The proposed ballast consists of an EMI Filter, a full-bridge rectifier, a passive power factor correction (PFC) circuit and a full-bridge inverter. The passive PFC is used and a Full-Bridge inverter operation by two frequency. High Side and Low Side switch was driven by high frequency and low frequency and realized buck Converter's operation. The lamp is driven by Low Frequency square wave to avoid Acoustic Resonance. Also, bulk of inductor is reduced by high frequency switching. Performance of the proposed ballast was validated through computer simulation using Pspice, experimentation and by applying it to an electronic ballast for a prototype 700W MHL.

**Key Words** : Full-Bridge Inverter, Buck Converter, MH Lamp, Passive PFC

#### 1. 서 론

HID 램프 중 MH(Metal Halide) 램프는 수은, 아르곤 가스 외에 스칸듐(Sc), 토륨(Th), 나트륨(Na) 등의

알카리 금속 원소를 할로젠 원소와 화합시킨 금속 할로겐이 봉입되어 있어 광 효율 상승과 높은 연색성, 다양한 색온도, 긴 수명 등의 장점을 가지고 있다.<sup>[1]</sup> 이와 같은 장점으로 인해 가로등 및 옥외 조명 등에서 주로 사용되어져 왔으나 최근에는 운동장, 대형 매장의 전 시용 조명등으로 사용 범위가 확대되고 있다.<sup>[2]</sup> 전자식 안정기는 자기식 안정기보다 무게가 가볍고, 크기가 작으며, 광 효율이 높다는 장점이 있다. 그러나 스위칭 소자의 사용으로 신뢰성이 저하되며, 음향공명현상이 발생하는 문제점이 있다.<sup>[8]</sup>

<sup>†</sup>교신저자 : 학생회원, 강원대 전기전자공학과 석사과정  
E-mail : kkn2402@nate.com

<sup>\*</sup>정회원, 강원대 전기전자공학과 교수

<sup>\*\*</sup>학생회원, 강원대 전기전자공학과 학사과정

접수일자 : 2010. 8. 16                      1차 심사 : 2010. 8. 27

심사완료 : 2010. 8. 30

음향공명현상을 제거하기 위해서는 저주파 구형과 구동, 스위칭 주파수 변조기법등 여러 방법들이 있다. 이들 중 저주파 구형과 구동 방식은 부하의 인덕터의 부피 상승과 회로가 복잡해지는 문제로 인해 많은 제한이 뒤따른다.<sup>[4]</sup>

본 논문에서는 수동 PFC와 Buck Converter 동작 원리를 이용한 Full-Bridge Inverter를 제안하여 회로의 구성을 간단하게 하였고, 적은 부피의 부하 인덕터와 램프에 저주파수 구형과를 공급하였다. 이로 인해 음향공명현상에 대한 문제점을 해결하도록 하였다.

## 2. 본 론

그림 1은 제안된 전자식 안정기 개략도이다. 제안된 전자식 안정기는 입력 단부터 EMI 필터, 수동 PFC, Full-Bridge(FB) 인버터 그리고 점화기로 구성된다.

제안한 안정기는 기존의 전자식 안정기에서 주로 사용되는 능동 PFC를 수동 PFC로 대체하여 Buck 컨버터를 제거하였다. 이에 따라 스위칭 소자 및 드라이브 IC의 사용량이 감소하여 신뢰성이 향상하였으며, 기존의 3-stage 구조를 2-stage 구조로 하여 그림 2와 같이 회로의 구성이 간단해졌다.

### 2.1 수동 역률 보상 회로

PF와 THD를 국제 기준에 맞추기 위해 여러 형태의 수동 역률 보상 회로가 사용되어지고 있다. 본 논문에서는 여러 수동 역률 보상 회로 중 LCD타입에 SI(Series Inductor) Filter를 결합한 형태의 수동 역률 보상 회로를 제안하였다.<sup>[3]</sup>

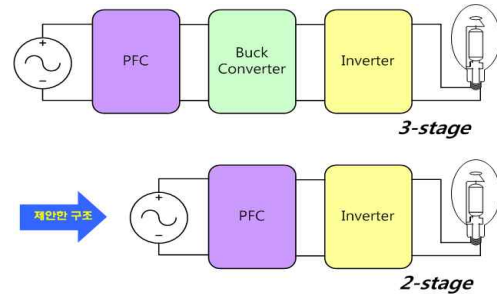


그림 2 전자식 안정기 구조  
Fig. 2 Structure of electronic ballasts

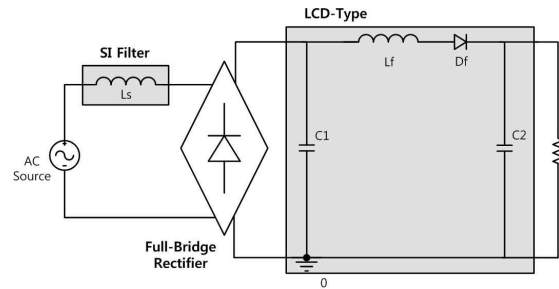


그림 3 제안한 수동 역률 보상 회로  
Fig. 3 Propose Passive PFC

그림 3은 제안한 전자식 안정기의 수동 역률 보상 회로이다. LCD-Type의 PFC는 다이오드에 의해 C2에 저장된 에너지가 부하에 모두 공급되는 특징을 가지며, SI Filter의 Ls는 입력으로 유입 되는 돌입전류를 제한하여 회로를 보호하는 역할을 한다. 제안한 수동 PFC는 이 두 가지 특징을 결합하여 돌입전류로부터 회로를 보호하고, 역률을 개선하였다.

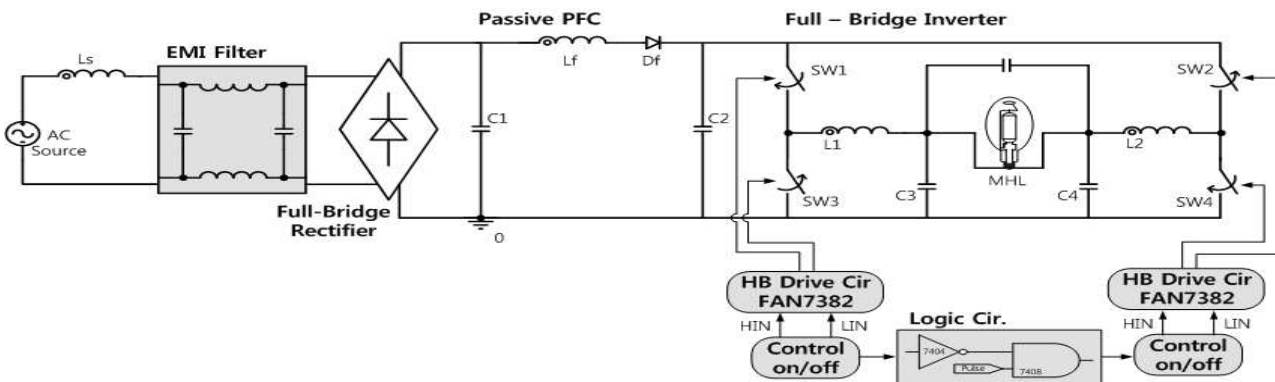


그림 1 제안된 전자식 안정기 블록도  
Fig. 1 Configuration of the Proposed Electronic Ballast

표 1 수동 PFC 회로의 설계 목표  
Table 1 Design purpose of Passive PFC Circuit

Parameter	Value
$V_{in}$	ac 220[V]
$V_{DC-link}$	210[V]
$V_{ripple(DC-link)}$	$210 \times 10\% = 21[V]$
Power Factor	$0.9 \leq$
$V_{Lamp}, I_{Lamp}$	85[V], 8.5[A]
$f_{Lsw}, f_{Hsw}$	150[Hz], 71[kHz]
$THD_{in}$	$20\% \geq$

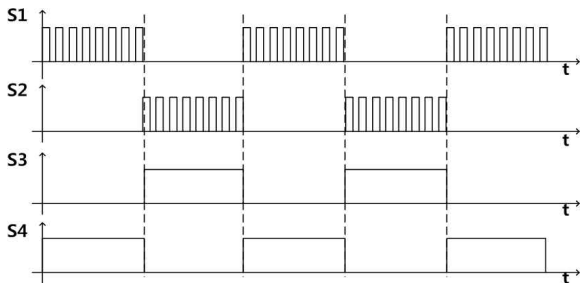


그림 4 Full-Bridge Inverter의 출력 전압 및 게이트 전압  
Fig. 4 Gate signals and output voltage of full-bridge inverter

### 2.2 Full-bridge Inverter

전자식 안정기는 THD와 역률을 개선하기 위해 역률 보상회로(PFC)를 사용하며, 램프의 정격을 맞추기 위하여 Inverter를 사용한다. 제안한 Full-Bridge Inverter 각각의 전력용 스위치가 Buck converter의 동작을 하도록 그림 4와 같이 스위치의 ON 신호를 인가한다.

제안한 Full-Bridge Inverter는 S3과 S4는 150Hz의 저주파수로, S1과 S2는 100kHz의 고주파수로 스위칭을 하여 벅 컨버터의 형태로 부하에 전력을 공급한다. 제안한 Full-Bridge Inverter는 스위치의 상태에 따라 부하를 기준으로 2가지 모드로 구분할 수 있다.

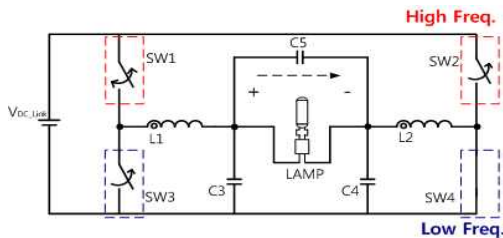


그림 5 Positive Mode  
Fig. 5 Positive Mode

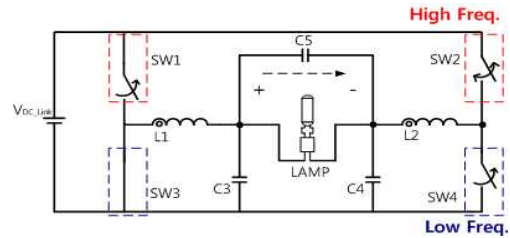
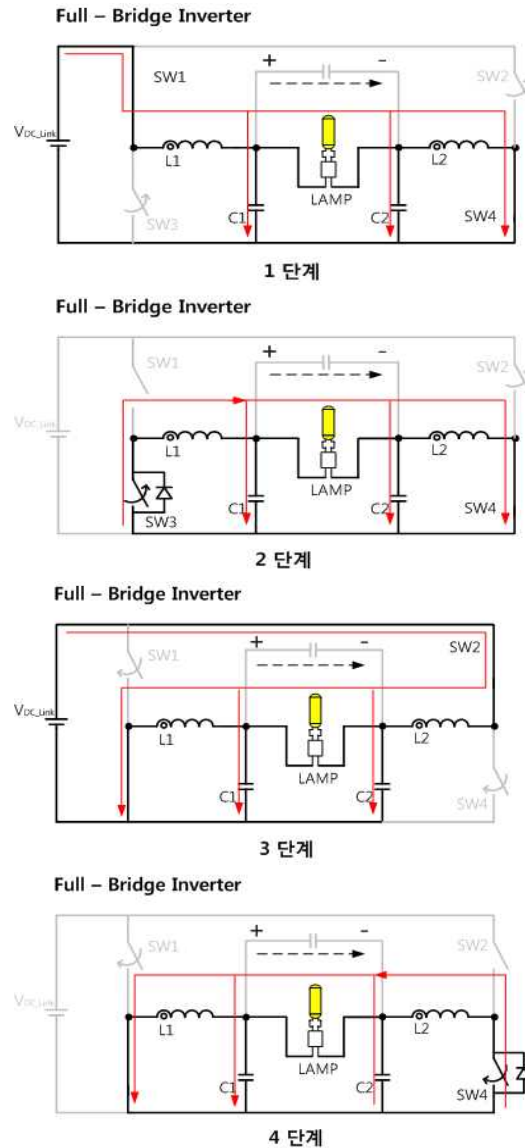


그림 6 Negative Mode  
Fig. 6 Negative Mode

그림 5와 같이 S1,S4가 동작을 하는 구간을 Positive Mode, 그림 6과 같이 S2, S3이 동작하는 구간을 Negative Mode로 구분하며, 총 4단계로 표현할 수 있다.



- 1 단계: S1, S4가 on상태로 L1, L2에는 전류가 부하를 기준으로 선형적으로 증가한다.
- 2 단계: S1은 off, S4는 on인 상태로 L1, L2에 흐르던 전류는 S3의 Body Diode를 통해 환류하게 된다.
- 3 단계: S2, S3가 on상태로 L1, L2에는 전류가 부하를 기준으로 선형적으로 감소한다.
- 4 단계: S3은 on, S2는 off인 상태로 L1, L2에 흐르던 전류는 S4의 Body Diode를 통해 환류하게 된다.

다음과 같은 동작을 정해진 스위칭 주파수에 따라 하게 된다. 이때 고주파 성분은 부하 앞, 뒤에 위치한 LPF(Low Pass Filter)를 통해 제거되고, 저주파 성분만 부하에 공급된다.

### 3. 제안한 전자식 안정기 설계

#### 3.1 수동 PFC 회로 설계

제안된 700W 전자식 안정기는 국제 고조파 제한 규격 IED 100-3-2 Class C의 규정에 만족하도록 설계되었다. 수동 PFC의 소자들은 참고 논문 [5, 6]과 반복된 시뮬레이션을 통해 결정하였다. 시뮬레이션 tool은 Pspice를 이용하였으며 결정된 소자 값들은 표 2에 나타내었다.

표 2 수동 PFC 회로의 소자값  
Table 2 Component Value of Passive PFC Circuit

Parameter	Value
$L_s$	60[mH]
$L_f$	18[mH]
$C_1$	60[μF]
$C_2$	940[μF]

#### 3.2 Full-Bridge Inverter 설계

제안된 전자식 안정기의 Full-Bridge Inverter는 기본적으로 2개의 벅 컨버터를 양방향으로 구동하여 램프에 전력은 공급한다. 따라서 설계는 벅 컨버터의 설계 절차를 기본으로 한다.

##### 3.2.1 인덕터 선정

인덕터의 부피를 줄이기 위해 Continuous Current Mode(CCM)를 적용하여 인덕터에 흐르는 전류의 최대값을 낮추었다. 또한 인덕터 설계를 하기 위해 벅 컨

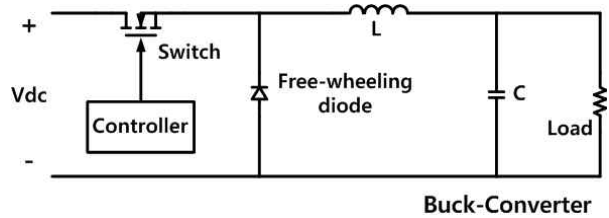


그림 7 일반적인 벅 컨버터  
Fig. 7 General Buck Converter

버터의 스위치는  $R_{DS(on)} = 0$ ,  $R_{DS(off)} = \infty$ 인 이상적인 스위치라 가정을 한다. 인덕터의 값은 식 (1)을 통해 얻을 수 있다.

$$L = (V_{IN_{MAX}} - V_{OUT}) \times \frac{V_{OUT}}{V_{IN_{MAX}}} \times \frac{1}{f_{sw}} \times \frac{1}{LIR \times I_{OUT_{MAX}}} \quad (1)$$

식 (1)에서  $f_{sw}$ 는 벅 컨버터의 스위칭 주파수로 71kHz,, LIR은 인덕터에 흐르는 전류에 대한 리플의 비율을 나타낸다. 본 논문에서는 출력전류의 허용 리플을 1A로 정하여 LIR은  $\frac{1}{8.5} = 0.117$ 로 결정하였다.

$$L = (210 - 85) \times \frac{85}{210} \times \frac{1}{71k} \times \frac{1}{0.117 \times 8.5} = 712\mu H$$

식 (1)을 통하여 얻어진 인덕터의 값은 712μH이다.

##### 3.2.2 출력 커패시터 선정

출력 정전 용량은 벅 컨버터의 출력 전압의 오버슈트 및 리플을 최소화 하도록 요구된다. 큰 오버 슈트는 불충분한 출력 정전용량에 의해 야기된다. 그리고 큰 전압 리플은 불충분한 정전 용량과 Equivalent Series Resistance(ESR)에 의해 야기 된다. 허용된 출력 전압의 오버슈트와 리플의 최대치는 대체적으로 설계할 때 정해진다.<sup>[7]</sup> 따라서 리플에 대처하기 위해서는 충분한 정전 용량과 낮은 ESR을 갖고 있는 커패시터를 출력에 사용하여야 한다. 출력 커패시터의 값은 식 (2)에 의해 얻을 수 있다.

$$C_o = \frac{V_{OUT} \times D \times Ts^2}{8 \times L \times \Delta v_o} \quad (2)$$

식 (2)에서  $D$ 는  $(1 - D)$ 를 나타내며,  $\Delta V_o$ 는 출력 전압의 리플을 나타낸다. 본 논문에서는 듀티는 0.4, 출력전압의 리플은 5%로 약 4V로 결정을 하였다.

$$C_o = \frac{85 \times (1 - 0.4) \times 14.08 \mu^2}{8 \times 700 \mu \times 4} = 0.45 \mu F$$

결정된 출력 커패시터의 신뢰성을 위해 허용 전류 및 ESR이 고려되어야 한다.

벽 컨버터의 출력 커패시터에 흐르는 전류는 인덕터 전류의 리플분이 흐르므로 이 전류의 실효치  $I_{crms}$ 는 다음과 같다.

$$I_{crms} = \frac{\Delta i}{2\sqrt{3}} = \frac{I_{omin}}{\sqrt{3}} = \frac{7.5}{\sqrt{3}} = 4.33 \quad (3)$$

이 결과로부터 ESR을 구하면

$$ESR = \frac{\Delta V_{orms}}{I_{crms}} = \frac{4}{4.33} = 0.923 \Omega \quad (4)$$

이 된다.

앞서 설명한 수식에 의해 결정된 Full-Bridge Inverter의 소자값들은 표 3에 나타내었다.

표 3 풀 브릿지 인버터의 소자값  
Table 3 Component Value of Full-Bridge Inverter

Parameter	Value
$L_1$	700[ $\mu H$ ]
$L_2$	700[ $\mu H$ ]
$C_3$	0.47[ $\mu F$ ]
$C_4$	0.47[ $\mu F$ ]
ESR	0.923 $\Omega$

#### 4. 시뮬레이션 및 실험

##### 4.1 시뮬레이션 결과

제안한 전자식 안정기의 동작을 확인하기 위해 3절에서 얻은 소자값을 회로에 적용하여 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 tool은 Pspice를 사용하였으며, 부하로는 램프를 저항으로 등가 하였다. 램프는 저주파수로 구동 할 때는 R-L부하로 등가된다. 그러나 저주파수에서 인덕터의 임피던스가 저항에 비해 매우 작게 나타나므로 저항 등가가 가능하다 가정하였다.

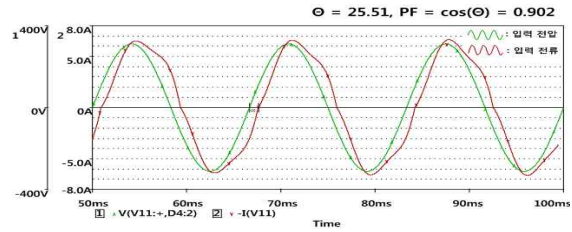


그림 8 입력 전압 / 전류(모의 실험)  
Fig. 8 Input Voltage / Current(simulation)

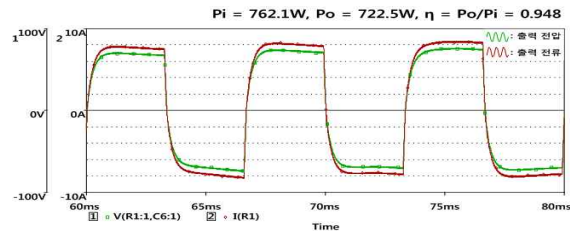


그림 9 출력 전압 / 전류(모의 실험)  
Fig. 9 Output Voltage / Current(simulation)

시뮬레이션 결과 입력 전압과 전류 간 위상차는 약 25도 정도로 역률은 0.902로 나타났다. 램프에는 150Hz의 구형파로 722.5W가 출력되었다.

##### 4.2 실험 결과

시뮬레이션 결과를 바탕으로 회로를 구성하여 제안한 전자식 안정기의 성능을 검증하기 위해 실험을 하였다. 측정에 사용된 오실로스코프는 LeCroy사의 WaveRunner 104Mxi이다. FB 인버터에 사용된 스위치는 고주파수 스위칭에는 STW45NM60을 사용했으며, 저주파수 스위칭에는 FGH75N60SF를 사용하였다. Drive IC는 FAN7382를 사용하였으며, 램프는 Philips 社의 MH램프 MSR-700을 사용하였다. 램프를 점등 시켜 주기위한 점화기는 배전압 회로에 의해 아크갭이 동작하는 형태의 외부 점화기를 사용하였다.

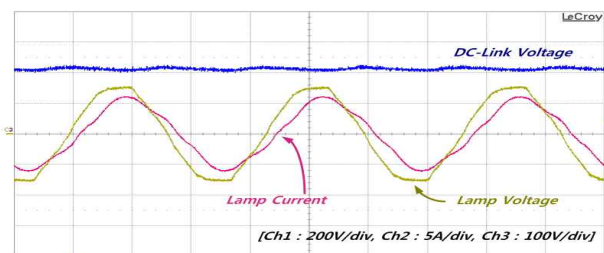


그림 10 입력 전압 / 전류(실험)  
Fig. 10 Input Voltage / Current(experimentation)

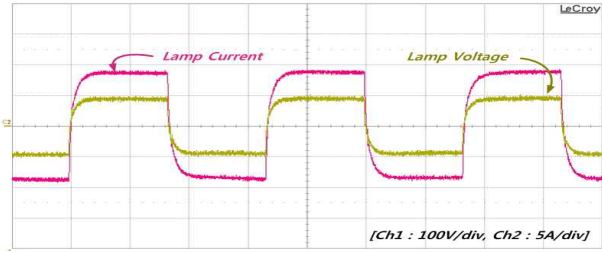


그림 11 출력 전압 / 전류(실험)  
Fig. 11 Output Voltage / Current(experimentation)

그림 8의 시뮬레이션을 통해 얻은 램프의 입력 전압/전류 파형과 그림 10의 실험을 통해 얻은 입력 전압/전류가 일치함을 볼 수 있다. 입력 전압과 전류의 실효치는 각각 220.2V/3.83A이며, 이때 역률은 0.906, THD는 8.71%이며 입력 전력은 764W로 측정되었다.

수동 PFC의 출력전압은 210V로 약 Δ20V의 리플을 포함하는 것으로 측정되었다.

그림 11은 램프 양단 전압과 전류를 측정된 파형으로 시뮬레이션 결과와 일치함을 확인 할 수 있다. 램프 양단 전압과 전류의 실효치 값은 각각 85.7V/8.18A로 출력 전력은 701W로 측정되었다. 고주파수 스위칭에 의한 성분은 램프 앞단에 로 된 LC필터에 의해 모두되었거 되고, 램프에는 저주파수 성분만 인가되는 것을 확인 할 수 있다.

### 4.3 제안한 전자식 안정기 특성

제안한 전자식 안정기의 효율, 입력 PF, 입력 전류 THD를 측정하여 표 4에 나타내었다.

표 4 측정 데이터  
Table 4 Measured Date

Parameter	Value
$V_{in}$	220[ V ]
$V_{DC-link}$	212.2[ V ]
$V_{ripple(DC-link)}$	$212.2 \times 10\% = 21.2[ V ]$
Power Factor	0.906
Input Power	764
$V_{Lamp}$	85.7[ V ]
$I_{Lamp}$	8.18[ A ]
$f_H, f_L$	150[ Hz ], 71[ kHz ]
$THD_{in}$	8.71%

제안한 전자식 안정기는 램프 스펙에 맞추어 출력 전력을 700W에 맞추었으며, 이때 효율은 90%로 나타났다.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{701}{764} \times 100\% = 91.75\% \quad (5)$$

입력 THD와 입력 PF는 20%이하, 0.9이상인 국제 규격을 만족하는 8.71%, 0.906로 나타났다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 수동 PFC와 Buck Converter 동작 원리를 이용한 Full-Bridge Inverter를 제안하였다. 기존의 능동 PFC의 사용으로 인해 발생하는 스위칭 잡음과 신뢰성 저하 문제를 수동 PFC의 사용으로 해결하였다. 또한, 수동 PFC의 성능은 20%이하의 THD, 0.9이상의 역률을 만족하였으며, 2-stage 구조로 시스템을 간단히 하였다.

기존의 단일 주파수 형태로 구동을 하던 풀 브릿지 인버터를 High-side와 Low-Side의 스위치를 구동을 2개의 주파수로 달리하여 Buck converter의 동작을 하도록 하였다. 벡 컨버터 동작 시 고주파수 성분은 설계한 LC필터에 의해 제거되고, 램프에는 저주파수 성분만 인가하게 된다. 즉, 부하 인덕터의 크기는 줄이고 램프에는 구형저주파를 공급하여 음향공명현상을 제거하였다. 그러나 수동 PFC 회로의 특성상 입력 전원의 변동에 취약함으로 향후 이를 보완하기 위한 연구가 진행 되어야 할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.  
(No.2010-102-03002-10)

### 참 고 문 헌

- [1] 박종연, 이봉진, 김기남, “음향 공명 현상을 제거한 MHL용 고출력 전자식 안정기 설계”, *대한전기학회*, Vol. 57, pp. 1187-1194, 2008.
- [2] Weiping Zhang, Yuanchao Liu, Xiaoqiang Zhang, Hongtao Li and Wenji Liu, “Low Frequency Model for the Metal Halide Lamp”, *IPEMC 2006*, Vol. 2, pp. 14-16, 2006.

- [3] Mangesh Borage, Sunil Tiwari and S.Kotaiah, "Passive Techniques for Compliance of Single-phase Rectifiers with IEC 1000-3-2 Norms", *Processing of INCEMIC*, 2003.
- [4] Moo. C.S., Huang. C.K., Lee. K.H., Huang. D.J., "Two-stage electronic ballast for metal halide lamps with embedded buck-conversion and ignition circuit", *ISIEA 2009*, Vol. 2, pp. 895-899, 2009.
- [5] K.N.Sakthivel, Sisir K.Das, K.R.Kini, "Importance of Quality AC Power Distribution and Understanding of EMC Standards IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-3 & IEC 61000-3-11", *Proceeding of INCEMIC*, 2003.
- [6] Mangesh Borage, Sunil Tiwari and S.Kotaiah, "Passive Techniques for Compliance of Single-phase Rectifiers with IEC 1000-3-2 Norms", *Processing of INCEMIC*, 2003.
- [7] Donald Schelle, jorge Castorena, "Buck-Converter Design Demystified", *Power Electronics Technology*, 2006, June.
- [8] 김기남, 박종연, 최영민, "음향 공명 제거 및 과도 상태 전류를 제한시킨 고출력 메탈 헬라이드 램프용 전자식 안정기 설계", *대한전기학회*, Vol. 59, pp. 904-911, 2010.

## 저 자 소 개



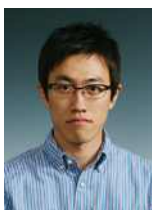
### **김기남(金基南)**

1983년 7월 4일생. 2009년 강원대 전기전자정보통신공학부 전기전자전공 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정.



### **박종연(朴鐘演)**

1951년 2월 23일생. 1973년 고려대 전자공학과 졸업. 1980년 경북대 대학원 졸업(석사). 1984년 경북대 대학원 졸업(공학박). 1973년~1977년 KIST 연구원. 1977년~1984년 울산대 공대 조교수, 부교수. 1984년~현재 강원대 전기전자정보통신공학부 교수.



### **최영민(崔榮敏)**

1986년 6월 7일생. 2005년~현재 강원대 전기전자전공 학사과정.