

세라믹 메탈할라이드 램프용 안정기의 점화기 설계 방법

Igniter design methods of the ballasts for Ceramic Metal Halide lamp

박 중 연* 최 왕 섭**

Park, Chong-Yeun Choe, Wang-Seop

Abstract

We described the operating principles of two different type of igniters for lightning of Ceramic Metal Halide Lamp(CMHL) and also provide some useful comparisons. One is for magnetic ballast, the other one is for electronic ballast which operates lamp by low-frequency square-waveform. Ignition voltage of lamp depends on the structure of igniter, such as the length and electrical characteristics of cable, which make troubles for ignition in real sites. Therefore, we measured and analyzed ignition voltages from igniters which are used in magnetic and electronic ballast in cables at a distance of 5 meters between a lamp and a igniter to suggests an applicable solution in real sites.

키워드 : 세라믹 메탈할라이드 램프, 점화기, 자기식안정기, 전자식안정기, 케이블
Keywords : *Ceramic Metal Halide Lamp, Igniter, Magnetic Ballast, Electronic Ballast, Cable*

1. 서론

MHL(Metal Halide Lamp)는 다른 광원에 비해 높은 연색성과 광효율, 긴 수명의 장점을 갖고 있어 옥외 조명, 도로 조명, 스포츠 시설물 등에서 각광 받고 있는 조명 광원이다. MHL는 색 구현력이 뛰어난 백색 광원이고 광효율이 높아 에너지 절감효과가 크다. 최근에 석영(Quartz)으로 이루어져있던 아크 튜브를 세라믹(Ceramic)으로 대체한 세라믹 MHL가 개발되어 탁월한 내열성 및 내식성으로 MHL로 하여금 더욱더 우수한 색 온도 및 연색성 유지 특성을 갖게 하였다.[1][2] 하지만 세

라믹 MHL는 빛이 떨리는 현상인 음향공명 현상이 발생할 수 있는 단점을 갖고 있어 취급하는데 까다롭다는 단점과[3] 기존의 MHL보다 긴 방전관으로 인해 보다 높은 램프 점등전압이 요구되는 단점이 있다. Phillips 150W 세라믹 램프를 위해서는 3kV 이상의 점등전압이 필요하다.[4] 이러한 높은 점등전압을 얻기 위해서는 램프 구동을 위한 별도의 점화기의 설계가 필요하다. 높은 점등전압의 발생 및 구동은 회로에 사용된 반도체 소자의 수명을 감소시키는 주요원인이 되고 있으며 안정기의 구동 방식에 따라 램프와 안정기 간 전선의 길이 및 종류가 미치는 영향 또한 다르다.[5]

본 연구에서는 세라믹 MHL 150Watt용 안정기를 이용하여 램프점등에 필요한 각 종 점화기를 설계하고 비교한다. 자기식과 전자식 2종의 안정기를 이용하여 5m 케이블 길이에 따라 램프에 미치는 영향을 검토하고자 한다.

* 강원대학교 전기전자공학과 교수, 공학박사, 교신저자

** 강원대학교 전기전자공학과 4학년

2. 자기식안정기 Igniter의 설계 및 특성

2.1 Igniter의 동작원리

자기식 안정기의 Igniter 구조는 회로가 간단하고 신뢰성이 높은 RLC직렬공진을 이용하였다.[6]

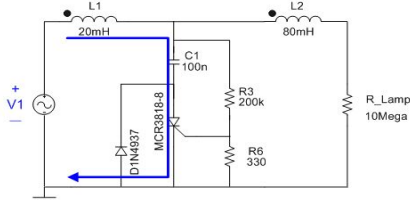


그림 1 60Hz의 양의 반주기 전류루프

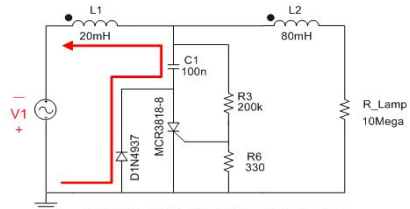


그림 2 60Hz의 음의 반주기 전류루프

위 회로에서 입력전원이 음의 구간일 때에는 C₁(커패시터)에 입력전압과 동일한 전압을 충전하였다가 입력전원이 양의 구간일 때 R₁, R₂의 전압 분배에 의해서 S₁(SCR Thyristor)의 게이트에 전압을 가하고 이때 순간적인 Turn-on으로 발생하는 썬지성 전류로 인해 L₁에는 최대 입력전압에 2배에 달하는 유기전압이 발생된다. 이 전압은 단권 변압기의 원리에 의해 턴 수 비(N₂/N₁)로 L₂에 가해진다.

결국 램프에는 순간적으로 V_{in}(입력전압), V_{L1}(L₁ 양단 전압), V_{L2}(L₂ 양단 전압)가 모두 더해진 높은 전압이 가해진다.

2.2 Igniter의 설계방법

이그니션 전압을 발생시키려면 L₁과 C₁의 값이 Under-damping 조건에 만족해야한다. 이그니션 전압의 크기는 L₁과 L₂의 턴 수비를 이용하여 조절하며 고려사항으로 SCR의 전압/전류용량 등을 고려하여 소자선택을 해야 한다.

단계 1. lamp spec에 따라 L₁값 결정.

- V_L : L 양단에 걸리는 전압의 rms값
 - I_L : L에 흐르는 전류의 rms값
 - f_L : 기본파의 주파수
- Inductance를 계산하면

$$L = \frac{1}{2\pi f} \frac{V}{I} \text{ [Henry]} \dots\dots\dots(1)$$

단계 2. N₁:N₂ 권선비의 결정

점등 전, Lamp양단에 걸리는 전압 V_{Lamp}는 KVL (키르히호프 전압법칙)에 의하여 V_c와 V_{L2}의 합으로 나타낼 수 있다. 따라서 Lamp 양단에 발생하는 이그니션 전압의 크기는 식 (2)와 같이 정의 할 수 있다.

$$V_{ignition} = V_c + \frac{N_2}{N_1} V_{L1} = V_{in} + (1 + \frac{N_2}{N_1}) V_{L1} \dots\dots (2)$$

$$(\because V_c = V_{in} + V_{L1}, V_{L1(p)} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{GT} + V_{in(p)})$$

식 (1)를 이용하여 N₁:N₂ 턴 수비에 관한 수식으로 나타낼 수 있으며, 식 (3)으로 정리된다.

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{V_{ignition} - V_{in}}{V_{L1}} - 1 \dots\dots\dots (3)$$

단계 3. L₁에 의한 C값의 결정

L₁이 위에서 결정되었기 때문에 R_{Loop1}L₁C 직렬 회로에서 Under Damping의 조건을 이용하여 Capacitance를 결정한다. 단, 여기서 R_{Loop1}은 L₁과 C, 및 S₁의 기생저항성분의 합이다.

$$(\frac{R_{Loop1}}{2L_1})^2 < \frac{1}{L_1 C} \Rightarrow C < \frac{4L_1}{R_{Loop1}^2} \text{ [F]} \dots\dots (4)$$

식 (4)의 조건을 만족하면 된다.

단계 4. SCR (Thyristor)의 type 결정

SCR (Thyristor)은 C₁ 양단에 걸리는 전압 이상의 내압을 가져야 하고, On state RMS Current가 L₁의 Under damping 시에 발생할 수 있는 전류 이상을 도통시킬 수 있어야 한다. 그리고 V_{in(Peak to Peak)} 이상의 Peak Repetitive Forward Blocking Voltage를 가져야 한다.

2.3 Igniter 시뮬레이션

그림 3은 점화기의 동작을 확인한 P-spice 시뮬레이션 파형이다.

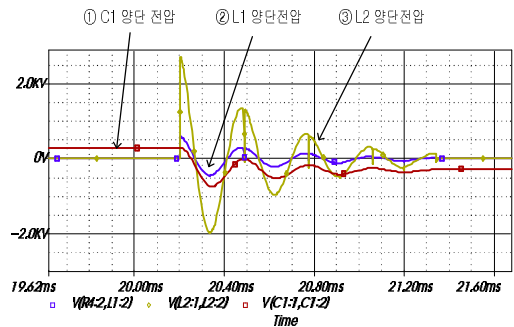


그림 3 Igniter의 damping 시뮬레이션 파형

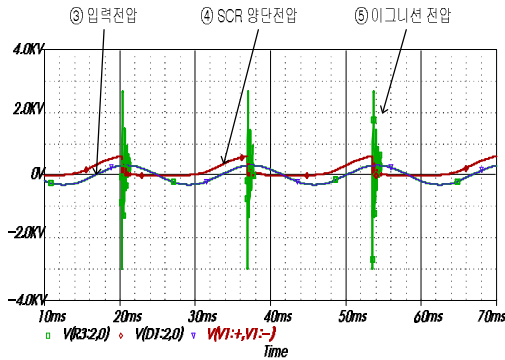


그림 4 Igniter 시뮬레이션 파형

그림 3에서 확인 할 수 있듯이 RLC 직렬공진을 이용한 단권변압기 원리에 따라 L_2 에 걸린 전압이 L_1 에 걸린 전압보다 크게 Under-damping하여 이그니션 전압을 발생시킨다.

2.4 Igniter 실험결과

그림 5는 자기식안정기에서 Igniter의 실험 파형이다. 시뮬레이션 파형과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 실험 파형에서는 이그니션 펄스의 반복 횟수가 시뮬레이션 파형보다 적은 것을 관찰할 수 있는데, 이것은 SCR 및 L과 C에 기생저항 성분이 이론보다 크기 때문이다.

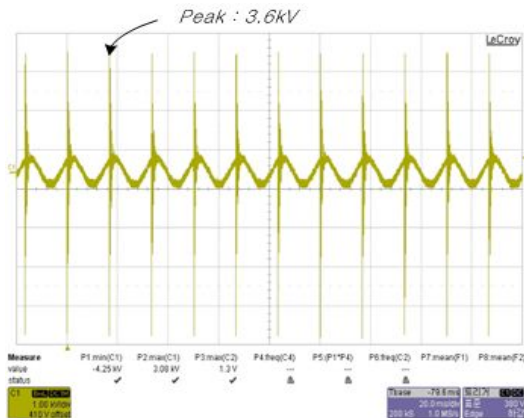


그림 5 igniter 실험 파형(1kV/div, 20ms)

3. 전자식안정기 Igniter의 설계 및 특성

3.1 LC 공진 Igniter의 동작원리

그림 6은 전자식안정기의 igniter 회로이며 점등 전 무부하 상태일 경우 안정기 출력 단에는

Inverter의 구동 주파수인 150Hz의 주파수를 갖는 스위칭 동작으로 인해 안정기의 출력으로는 0V의 평균전압을 갖고 V_{PFCout} 의 peak to peak 전압을 갖는 150Hz의 구형파 전압이 발생하게 된다. 스위치 S3가 turn on 하게 되면 T1의 1차 측인 L3에 전압이 발생하게 되면 턴 수비에 비례하는 높은 전압 pulse가 T1의 2차 측인 L4에 전달된다. 이 pulse는 안정기 출력의 구형파 전압과 더해져서 램프에 큰 전압을 가해지게 된다.

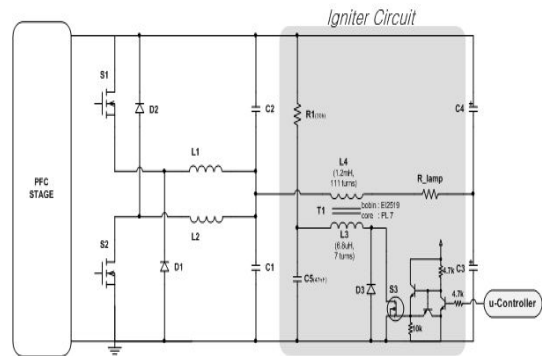


그림 6 Igniter circuit

고압 pulse의 발생 원리는 다음과 같다. PFC 출력 단에 병렬로 연결된 C_5 의 전압이 충전되어 PFC 출력 전압과 같아지게 되면 순간적으로 S3가 turn on되고 이 때 C_5 에 충전된 전압이 T1의 1차 측인 L3, S3를 통해 방전되어 L3에 높은 전압 V_{L3} 가 발생 한다.[7]

$$V_{L3} = L3 \frac{di_{L3}}{dt} \dots\dots\dots (5)$$

이 때 L3에 C_5 와 L3의 공진 주파수를 갖는 damping 전압이 발생되어 T1의 2차 측인 L4에 턴 수에 비례하는 높은 전압이 유기된다. 발생 된 고 전압은 램프 양단으로 가해져 방전관의 절연 파괴를 일으켜 아크를 형성하게 된다. R1은 C_5 가 방전 후 충전되는 시간을 제어하는 저항으로 이그니션 전압을 발생시키는 주기를 고려하여 결정해야 한다. L4의 등가임피던스는 램프가 정상상태일 때인 150Hz 주파수에서 램프의 등가저항보다 작게 설계 되어야 한다.

Igniter의 스위치는 IGBT를 사용하였고 구동회로는 TR 3개를 이용하여 간단하게 구성하였다. Igniter 스위치의 gate 신호는 마이크로 컨트롤러에 의해서 발생하게 된다. 안정기에 전원이 공급되면 마이크로 컨트롤러가 동작하게 되고 200ms가 지난 후 3ms를 주기로 duty 3.3%(100us)를 갖는 이그니션 pulse를 발생시키도록 구성되어 있다.

3.2 LC 공진 Igniter의 설계 및 제작

본 igniter의 설계조건은 다음과 같다.

- ① 고전압 변압기의 1차 전압(V_{L3}) : 484V
- ② 고전압 변압기의 2차 전압(V_{L4}) : 5000V

단계 1. 고전압 변압기 2차 인덕턴스(L4) 결정

먼저 고전압 변압기 2차 인덕턴스를 식 (6)과 같이 계산한다. 이 때 인버터에서 바라본 T1의 2차 측 인덕턴스(L4)의 임피던스를 램프의 등가 임피던스의 4% 이내로 하면

$$L4 \leq \frac{0.04 \times R_{lamp}}{2\pi f} = \frac{0.04 \times 60}{2 \times \pi \times 150} = 2.5mH \dots (6)$$

이다. 따라서 L4의 인덕턴스는 2.5mH보다 작으면 된다.

단계 2. 고전압 변압기 1차 인덕턴스 및 턴 수 결정

그림 7에서 2차 측 인덕턴스 L4 값을 약 1.2mH로 결정 할 때 EI2519(삼화, 재질:PL-7)에 감는 턴 수는 약 111턴이다. 1차 인덕턴스 L3에 484V 전압이 나타날 때 2차 측에 5kV 이상의 전압을 만드는 턴 수는 식(7)과 같이 계산할 수 있다.

$$V_{L4} = \frac{N2}{N1} V_{L3} \dots\dots\dots (7)$$

따라서, $5kV = \frac{111}{N1} \times 484V$ 이므로 N1은 10턴이 된다. 그러나 1차와 2차의 결합도와 누설 인덕턴스를 감안하여 N1를 7턴으로 결정하였다. 이 때, L3의 인덕턴스 값은 6.8uH이다.

단계 3. 커패시터 C5 결정

PL-7 재질의 코어는 250kHz 이상으로 자속을 변화시키면 코어의 손실이 커져서 턴 수에 비례한 전압으로 고전압을 발생 시킬 수 없게 된다. 따라서 고전압 변압기의 2차 측 인덕턴스 L3와 C5의 공진 주파수를 250kHz 보다 작도록 C5를 설계하면 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$C5 \geq \frac{1}{(2\pi \times f_o)^2 \times L3} \dots\dots\dots (8)$$

따라서 $C5 \geq 40nF$ 조건을 만족하면 되므로 C5

를 47nF을 사용하였다. C5의 값을 커질수록 주파수가 낮아지나 C5의 값이 커질수록 C5가 충전되는 시간이 길어짐으로 이를 고려해서 값을 결정해야 한다.

단계 4. 저항 R1 결정

램프가 점등 전에는 램프에 공급되는 전압을 올리기 위해서 PFC 출력 전압(DC-Link 전압)을 550V까지 승압된다. V_{C5} 는 R1과 C5의 시정수(τ)에 따라서 충전되며 식 (9)와 같다.

$$V_{C5}(t) = V_{DC-Link} + (V_0 - V_{DC-Link})e^{-\frac{t}{\tau}} \\ \tau = R_1 C_5 \dots\dots\dots (9)$$

마이크로 컨트롤러에서는 3ms의 주기로 100us 동안 스위치 S3을 turn on 시킨다. 위에서 484V의 전압이 L3에 걸린다는 조건을 만족해야한다. S3이 turn on되는 순간에는 C5의 전압이 순간적으로 변하지 못함으로 L3의 전압은 C5의 전압과 같다. 따라서 3msec 마다 C5에 484V의 전압이 충전되도록 R1을 결정하면 된다. 식 (4)로부터 R1은 30kΩ으로 결정하였다.

3.3 LC 공진 Igniter의 시뮬레이션

다음의 그림 7은 그림 6의 회로를 P-spice를 통해 확인한 것이다. 시뮬레이션은 150Watt Ceramic MHL용 전자식 안정기를 사용하였다.

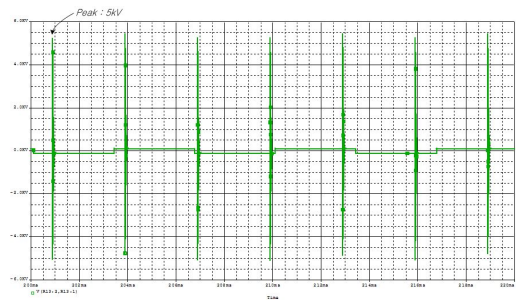


그림 7 Igniter의 시뮬레이션 파형

시뮬레이션 결과 R_{lamp}에는 약 5kV의 점등 전압이 공급되는 것을 볼 수 있다. R_{lamp}에는 LC 공진에 의한 높은 pulse와 구형파로 동작하는 인버터 특성에 의해 구형파 전압과 높은 pulse가 합쳐진 점등전압이 가해지게 된다. 그림 7에서 150Hz의 구형파와 ignition 전압의 동기가 맞지 않는 이유는 ignition 전압을 3ms마다 한 번씩 임의로 가해주기 때문이다.

3.4 LC 공진 Igniter의 실험 결과

그림 8은 실제 제작한 Igniter의 실험 결과이며 3.0kV 이상의 전압이 시뮬레이션과 동일하게 R_Lamp에 공급되는 것을 확인하였다.

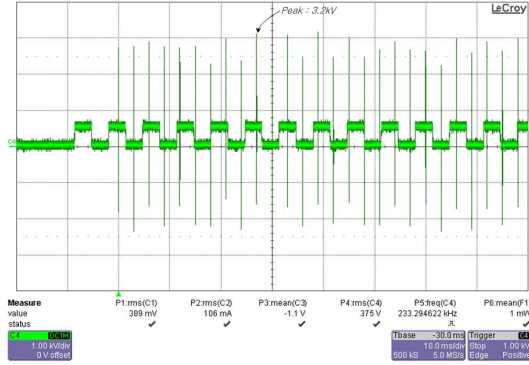


그림 8 Igniter의 실험 파형(1kV/10ms div)

4. 케이블 길이에 따른 특성 분석

케이블은 다음의 그림 9와 같은 등가회로로 표현할 수 있다.[8][9]

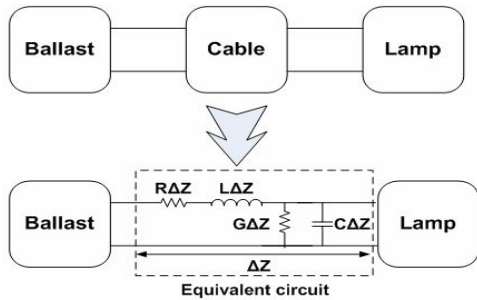


그림 9 케이블 등가 회로

현재 현장에서 사용되는 가로등 케이블의 특성을 R, L, C, G의 값으로 알 수 있다. 가로등 램프와 안정기 간의 케이블은 일반적으로 KS 규격[10]의 가교 폴리에틸렌 케이블(VCTF)을 주로 사용하고, 측정된 VCTF 케이블에 대한 데이터는 다음 표 1과 같다.

표 1 대한전선 Cable 특성(VCTF)

공칭단면적	2 mm ²
저항	9.79 Ω/km
커패시턴스	1.545 μF/km
인덕턴스	0.316 mH/km

4.1 자기식안정기 Igniter의 케이블에 대한 영향

그림 1의 자기식안정기 Igniter에 케이블을 연결하면 다음과 같이 등가회로를 모델링 할 수 있다.

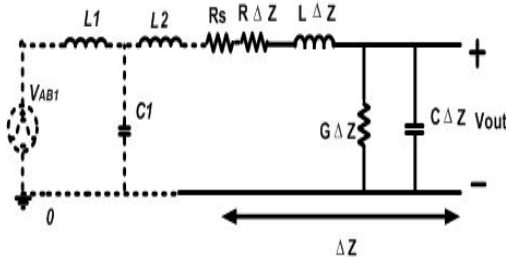


그림 10 자기식안정기 Igniter와 케이블 등가회로

위의 그림 10은 자기식안정기에 사용된 RLC 공진특성을 이용한 Igniter에 케이블을 연결하였을 때의 등가회로이다. 케이블의 길이는 5m로 하였고, 이 때 권선 저항 $R_s = 4\Omega$, $R = 0.0489\Omega$, $L = 1.58\mu H$, $C = 7.72nF$, $G = 0.002nS$ 로 값을 얻었다. 또 $L1 = 20mH$, $L2 = 80mH$, $C1 = 100nF$ 이다. Igniter의 출력을 계산했을 때 약 3.8kV이며, 케이블을 지났을 때 출력 V_{out} 은 약 3.4kV로 계산되었다. 이를 시뮬레이션을 통해 그림 11과 같음을 확인하였다.

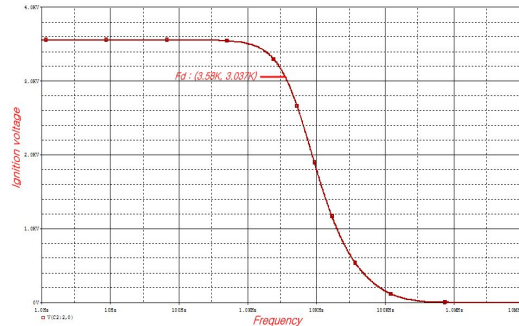


그림 11 자기식안정기의 Igniter 및 케이블 시뮬레이션

자기식안정기의 RLC 공진특성을 이용한 Igniter의 경우 Ignition pulse 주파수는 다음의 식에 의해 구할 수 있다.

$$f_d = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1 \cdot C1}} \dots\dots\dots (10)$$

이렇게 구해진 Under-damping 주파수 값은 약 3.58kHz이며, 실험에 의해서 얻은 ignition 전압은 그림 12와 같다. 이 때 전압은 약 3.6kV로 시뮬레이션 결과 이론과 유사함을 알 수 있다.

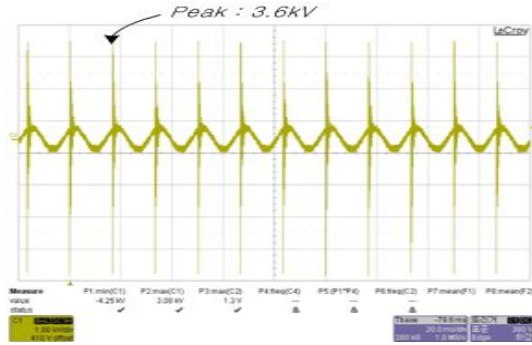


그림 12 자기식안정기 Igniter 실험 파형

또한 5m 케이블을 연결 하여 실험한 경우 Ignition pulse 전압이 3.4kV이며 시뮬레이션과 유사함을 알 수 있다.

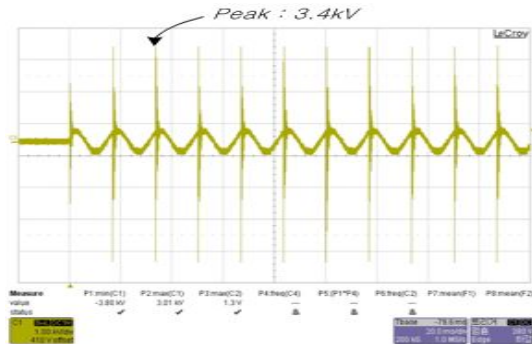


그림 13 자기식안정기 Igniter + 케이블 5m 실험 파형

4.2 전자식안정기 Igniter의 케이블에 대한 영향
전자식안정기 Igniter에 케이블을 연결하였을 때의 등가회로는 그림 10과 같다.

그림 6에서 LC 공진 주파수는 L3, C5에 의해 다음과 같은 수식에 의해 얻을 수 있다.

$$f_{ignition} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L3 \cdot C5}} \dots\dots\dots (11)$$

Ignition 시의 주파수는 식 (11)에 의해 약 281.5kHz 이며, 점등 전압은 그림 15와 같이 3.2kV가 된다. 이 때 5m 케이블을 지났을 때 점등 전압은 그림 16과 같이 2.5kV로 측정되었다.

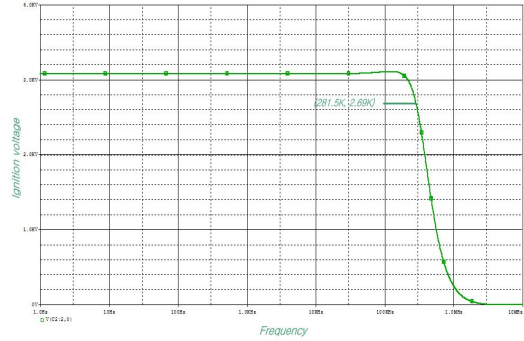


그림 14 전자식안정기 Igniter 및 케이블 시뮬레이션

시뮬레이션 결과 281.5kHz에서 약 2.69kV로 이론치와 유사함을 볼 수 있다.

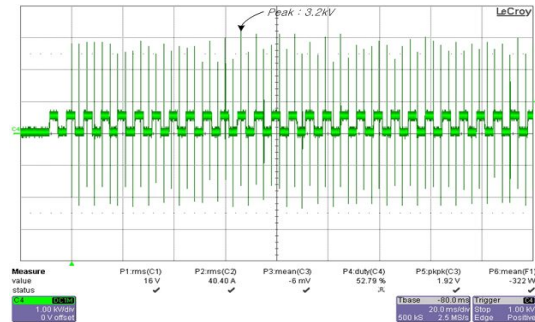


그림 15 전자식안정기 Igniter 실험 파형

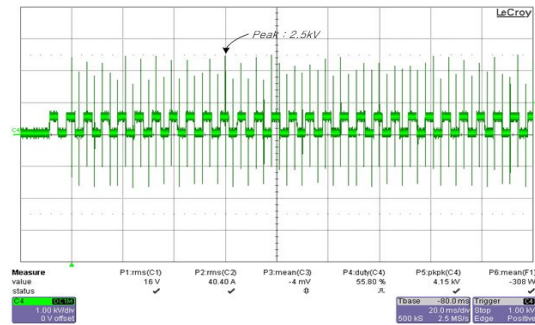


그림 16 전자식안정기 Igniter 및 케이블 5m 실험 파형

5. 결론

본 논문에서는 자기식안정기와 전자식안정기에서 각각 사용되고 있는 점화기의 비교 및 안정기와 램프 간 거리에 따른 점등 전압 감소 특성을 분석하였다. 또 각종 점화기의 설계방법 및 동작

특성에 대해 제시하였다. 실제 현장에서 문제시 되고 있는 안정기와 램프 간의 케이블 길이에 따라 다르게 나타나는 점등전압 감쇠현상을 이론적인 방법으로 접근하여 규명하였다.

다만 기존의 상업용 점화기의 임피던스 규격이 정확하지 못하고 측정 상에도 주파수에 따른 측정치의 상쇄가 있어 회로의 등가가 어렵기 때문에 해석 결과에 다소 오차가 나타나고 있다. 향후 이러한 점화기의 임피던스를 고려한 케이블 특성 분석에 대한 연구가 좀 더 다양한 케이블을 사용하고 다수의 점화기에 대하여 연구 된다면 좀 더 실제와 가까운 효과적인 분석이 가능할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 전력산업연구개발 사업(한국전기안전공사 전기연구원 주관과제)으로 수행되었음을 밝히며 관계자에게 감사하게 생각합니다.

참 고 문 헌

- [1] Junming Tu, "Influence of Mount Structure on Performance of Ceramic Metal Halide Lamps" Industry application, *IEEE Transaction on volume 44*. 1987-1992, Nov-dec 2008.
- [2] Theo G M M Kappen, "Status quo of ceramic material for metal halide discharge lamps" J. Phys. D, *Appl. Phys.* 38, pp.3033-3039, 2005.
- [3] Yan, W. Hui, S.Y.R., "Experimental study on acoustic resonance phenomena in high-intensity discharge lamps" Science, Measurement and Technology, *IEE Proceeding volume 153*, Issue 5, pp. 181-187, Sep. 2006.
- [4] Moo C.S., Huang C.K., Hsiao Y.N, "High-frequency electronic ballast with auto-tracking control for metal halide lamps" Industry Application Conference, *38th IAS Annial Meeting. Corference Record of the volume 2*, pp.1025-1029, Oct 2003.
- [5] 박종연, 김기남, "HID 램프용 점화기와 램프 간 거리에 따른 점등 특성 분석", *대한국조명설비학회, 조명·전기설비학회논문지*, Vol.23, No.6, pp.24-30. 2009.
- [6] 박종연, 임병노, "HID 램프용 안정기의 점화기 특성분석 및 제어용 IC의 동작영향 분석", *산업기술연구*, 제27권, B호, pp. 9-14, 2007.

- [7] 신동석, "Dual-buck 하프브리지에 의한 세라믹 MHD 램프용 전자식 안정기에 관한 연구", *강원대학교 석사학위 논문*, 2009.
- [8] Doron Shmilovitz, Sigmond Singer, "High-Frequency- Operated converters Based on Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 11, No.1, pp.142-146, Jan. 1996.
- [9] Doron Shmilovitz, Sigmond Singer, "Pulsed Power Generation by Means of Transmission Lines", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 18, No.1, pp.221-230, Jan. 2003.
- [10] KS 규격 MOD, KS C IEC 60502-1, 2002.