

트랜스포머의 자가 공진(Self-Resonance) 특성을 이용한 자가 발진(Self-Oscillation) UV 발생 플래시램프 전원장치설계 및 그 동작 특성

Design of the Self-Oscillation UV Flash Lamp Power Supply and the Characteristic of its Operation Using Self-resonance of the Transformer

김신호^{†*}, 조대권^{**}

Shin-Hyo Kim^{†*}, Dae-Kweon Cho^{**}

요 약 문

해상 및 육상용 살균방식으로 UV를 사용하는 시스템이 주종을 이루고 있으며, 의료, 생활, 산업용 시스템에 널리 적용되고 있으며, 근래에는 평형수 처리 방식으로 UV를 적용하는 사례가 등장하고 있다. UV 광원으로는 다양한 램프가 있으며 그 중 제논플래시 램프는 강한 섬광형 방전과 함께 다량의 UV를 방출하는 특성이 있어 매우 효과적이다. 다만, 타 광원에 비하여 높은 방전전압으로 인하여 기존의 전원장치 설계 방식으로는 장치의 크기가 크고 복잡한 문제가 있었으며, 이를 개량하기 위한 본 연구에서는 트랜스포머의 자가 공진(self-resonance)을 이용한 설계 기법을 제안하며, 트랜스포머의 특정주파수에서 고유임피던스 성분을 이용하여 출력전압을 필터링하면 제논방전관이 자가 발진방식으로 동작하므로 종래의 회로구성보다 간단하고 경제적인 아크방전 파워 스테이지의 구성이 가능하다.

※ **Keywords** : 자가 발진, 자가 공진, 자외선, 제논플래시램프, 전원공급장치

^{†*} 논문 주저자, 선박안전기술공단

^{**} 상영RND

1. 서 론

제논 아크방전은 매우 넓은 범위에서 응용되어 지고 있으며, 대표적으로 flash photography, 고체 레이저 Optical Pumping과 Ultra Violet(이하 UV) 발생장치에 주로 사용되었다.

본 연구에서는 UV 발생용 제논플래시램프의 전원공급장치를 설계함에 있어 제논방전관의 점등 특성에서 중요한 충·방전 특성 및 이를 적절히 제어할 수 있는 회로 구조를 통하여 시스템의 크기와 구성을 간소화하여 소출력 UV 발생 장치 시스템에 적용을 목적으로 한다.

제논 플래시램프는 2~3단계의 방전 단계를 거쳐 발광을 하게 되는데, 일반적인 제논플래시램프의 방전특성은 Fig. 1과 같이 트리거를 통한 절연파괴와 동시에 아크방전을 일으키며, 고출력의 경우는 절연파괴, 예비 장전, 아크방전의 순서로 방전을 유지한다. 여기서 예비방전용 전원 공급장치를 별도로 적용하는 것은 플래시램프의 수명과 램프의 임피던스를 감소시키기 위한 목적이 있다.

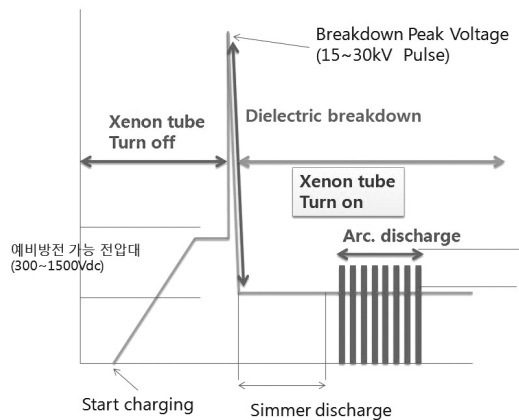


Fig. 1 Voltage characteristics of xenon lamp regarding discharge step

아울러, UV 발생 장치에 사용되는 제논 방전의 특성은 펄스특성을 갖게 된다.

Fig. 2와 같이 기존 제논 플래시 전원장치는 SCR, IGBT와 같은 대용량, 대전류 스위치를 이용하여 제논방전관에 고전압펄스를 인가하는 방식으로 점등 및 광펄스 발생률을 제어하는 방식을 적용하고 있으며, 이 방식은 시스템이 크고 특별히 구성된 제어기구와 구동 드라이버를 포함하는 반도체 스위치소자가 필수적으로 사용됨으로 시스템이 복잡해지는 원인이 된다.

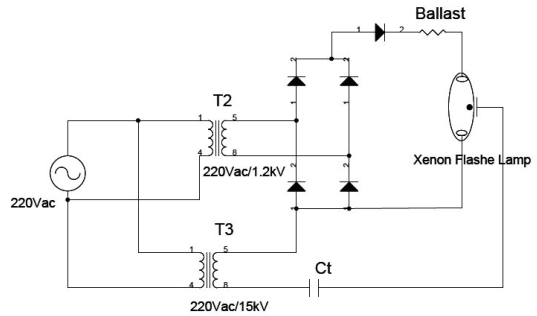


Fig. 2 Circuit for operating xenon flash lamp using strobo

따라서 본 연구에서는 아크 방전을 위해 제논 램프에 공급되는 전류를 Ballast(저항, 인덕터)를 통하여 제한하지 않고, 승압트랜스포머의 커패

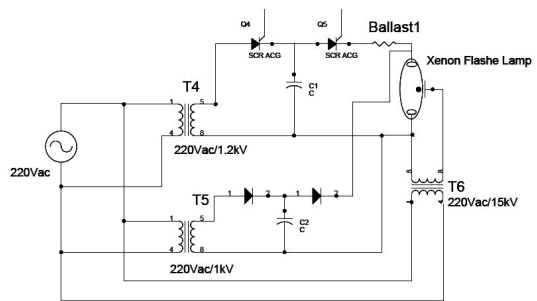


Fig. 3 Circuit for operating xenon flash lamp using pulsed power stage

시터 기생성분과의 공진과 내부 임피던스를 이용한 구동주파수 특성에 따른 전압의 특성 변화를 이용하여 UV 발생 장치용 자가 공진방식의 제논 램프 전원공급장치의 설계 방법과 그 동작특성을 소개한다.

2. 본 론

2.1 회로 구성

안전을 고려하여 수십 Voltage(이하 V)의 저전압 입력을 통하여 1~2kV의 피크전압으로 변환하기에 용이한 트랜스포머의 자가 공진을 이용하고, 출력 펄스발생은 트랜스포머의 고유 임피던스 성분과 출력 측 충전 커패시터와의 충전시정수를 이용하여 시간지연을 유도하며, 방전 요구전압에 충분히 출력전압이 도달하면 방전관을 턴 온(turn-on) 되게 하여, 이를 스스로 연속적으로 반복하는 방식으로 광펄스를 방출하는 방법이다. 즉, 출력 측의 아크방전과 관련하여 별도의 Micro Controller Unit(MCU)와 스위치 구동 드라이버 등을 필요하지 않으며 소형화, 간소화할 수 있으므로 저출력 제논 플래시램프의 전원공급 방법으로 적합하여 아크방전 유지 및 제어를 위한 고전압, 대전류 스트레스에 강한 고가의 SCR, IGBT와 같은 스위치 소자를 적용하지 않아도 되므로 경제성이 고려된 구조의 회로 (Fig. 4)를 제안한다.

2.2 자가 공진형 트랜스포머 설계

설계에 있어서 일반적으로는 높은 전압변환

비를 얻기 위해 1, 2차 측간의 권선 비에 의존하는 기존의 방법이 주를 이루며, 일례로 10~20V의 비교적 낮은 전압을 1~2kV의 고전압으로 승압시키는 경우, 통상 SMPS설계방식에 의하면 트랜스포머의 1, 2차간 1:100의 높은 권선 비에 의해서 기본 설계 정수가 결정된다. 또한, 1, 2차 측간 높은 권선비로 설계된 트랜스포머는 권선간 커패시터 기생용량으로부터 기인하는 부유용량이 존재하며, 이 부유용량과 트랜스포머의 1차 측 자화 인덕턴스 간에 공진을 유발하는 조건이 성립한다. 아울러 동일한 권선수로도 권선하는 방법 및 층간 절연에 따라서 내부 기생요소가 변동함은 이미 알려진 사실이다. 트랜스포머 제작시 소밀(疏密) 권선방법으로 2차 측을 권선할 경우, 조밀(稠密)한 권선방법에서 보다 기생용량이 줄어들고 커패시터 기생용량과 자화인덕턴스의 조합으로 결정되는 자가 공진 주파수는 높아지는 경향을 갖게 된다. 이와 같은 특성을 적극 이용하여 고역의 주파수에서 스위치소자를 구동할 경우 트랜스포머의 권선량을 줄일 수 있고 그로

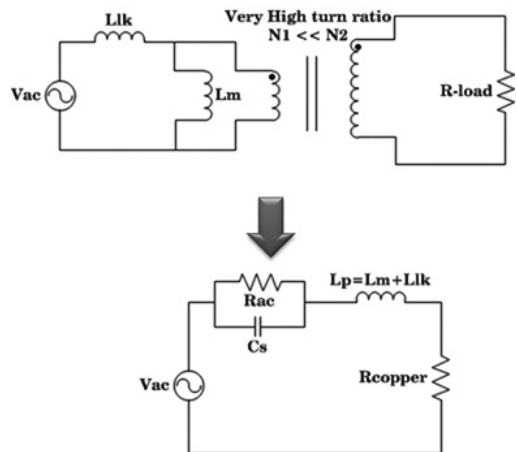


Fig. 4 Equivalent circuit of the self-resonance transformer output characteristics

인하여 트랜스포머의 크기가 줄어드는 장점이 있기 때문에 본 연구에서는 일반적인 구동주파수보다 다소 높은 200k~400kHz에서 구동하는 용도로 트랜스포머를 설계하였다.



Fig. 5 Output waveform by self resonance according to variable frequencies. (Push-Pull topology, turn ratio 2:80, primary inductance(Lm) 3.3uH, Left:300kHz/ 2kVpeak, Right: 265kHz/ 2.66kVpeak)

본 연구에서 설계하고자 하는 자가공진형 트랜스포머는 아래와 같은 식으로 일반화할 수 있다. 특히 소밀권선방법이란 Fig. 6과 같이 2차 측의 권선을 1~2mm의 간격으로 권선하는 방법으로 정의하고자 한다.

시중에 널리 사용되는 페라이트코어가 적용된 트랜스포머에 대한 소밀 권선법에 따른 권선비와

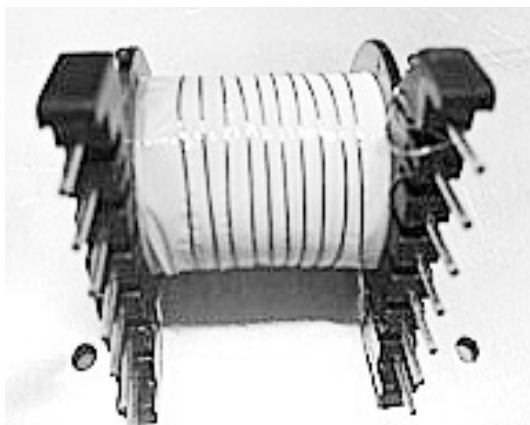


Fig. 6 Sparse winding method (1~2mm)

부유용량 (Cs)과의 관계식은 아래의 식 (1)과 같이 정리할 수 있으며 이에 따른 공진주파수는 식 (2)로 산출할 수 있다.

$$C_s = k \frac{N_2^2}{N_1^2}, \quad k = \text{부유용량상수} \quad (1)$$

$$f_{sr} = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_s L_{m1}}} \quad (2)$$

f_{sr} : 트랜스포머의 Self-Resonant Frequency

또한, 충전 시정수를 결정하는 중요한 인자인 트랜스포머의 임피던스는 아래와 같이 근사할 수 있다.

$$Z_{trans} \approx R_{coper} + j(2\pi f_{sr} L_m n^2) \quad (3)$$

$$\because R_{coper} \approx 0$$

$$Z_{trans} \approx (2\pi f_{sr} L_m n^2)$$

2.3 제논 방전관의 방전 조건

종래에는 방전관에 충분한 전류가 도통하기 위하여 예비방전 유지전압보다 높은 전압을 출력측의 커패시터에 충전하고, 이를 일시에 방전관에 도통하는 방식으로 아크방전을 발생시켰으나, 방전관 고유임피던스와 수명을 고려한다면 적절하지 않은 방법이라 할 수 있다. 특히 과전압을 방전관에 인가하면 강력한 아크 방전이 발생되기는 하나 예비방전의 불안정과 봉입가스의 조기 산화 및 높은 발열로 인한 관구(flashlamp)의 파손까지 유발될 수 있으므로 상기의 문제를 보완하고 최적방전을 위한 관구상태를 유지하기 위해서는 아래의 커패시터 충전전압 조건을 만족하여야 한다.

$$V_{sm} \leq V_c < 2V_{sm} \quad (4)$$

(V_c : Capacitor 충전전압,

V_{sm} : 예비방전 유지전압)

아울러, 방전을 통한 광 방출량의 조절은 상기와 같이 조절된 전압범위 내에서 충분한 커패시터 용량을 통한 방전관 통전 전류량에 의해서 결정된다.

$$I_c = \frac{C_b \Delta V_c}{\Delta t} \quad (5)$$

(I_c : 방전가능 전류량, V_c : 충전전압,

t : 충전시간)

여기서, 실제제 관구에 도통하는 전류량의 관계식은 다음과 같다.

$$I_c = \frac{C_b \Delta V_c}{\Delta t} \quad (5)$$

(I_c : 방전가능 전류량, V_c : 충전전압,

t : 충전시간)

식 (6)에 따라 방전관의 아크방전에 따른 고유 임피던스는 방전 전류량의 변화에 의해 변화하는 것을 알 수 있으며, 종래의 주장과 달리 최대방전 전류량은 커패시터 bank의 최대충전전류량과 동일하지 않음을 알 수 있고, 방전관에 가해지는 에너지는 다음과 같이 정리된다.

$$I_{arc} = \frac{(V_c - V_{off})}{R_{arc}} = \frac{C_b(V_c - V_{off})}{\Delta t} \quad (6)$$

(I_{arc} : Arc 방전 전류량, V_{off} : 방전종료전압,

V_c : 충전전압,

R_{arc} : 아크방전 개시 후 방전관 임피던스)

$$E = \int_{T_0} C_b d(V_c - V_{off}) \frac{dt}{dt} \quad (7)$$

$$E = \frac{1}{2} C_b (V_c - V_{off})^2 (J/sec)$$

또한, 충전 커패시터의 용량을 C_b 라 할 때 충전 정수 V_c 는 아래 Fig. 7과 같다.

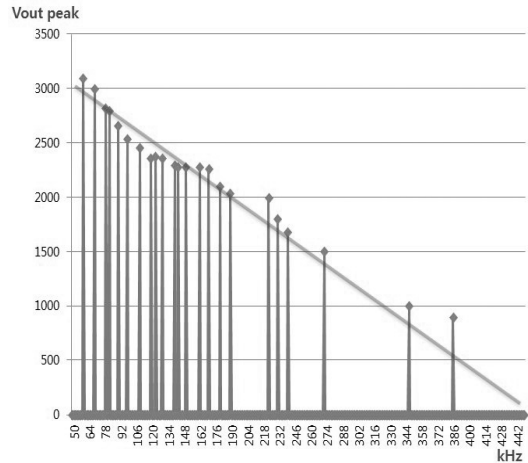


Fig. 7 Pulse peak voltage of transformer secondary winding, Vs Driving frequency ($L_m2=4.5mH$, 2:80 turn)

C_b 에 급전될 수 있는 전압의 최대값과 주파수와의 상관관계를 살펴보면, Fig. 7에서와 같이 C_b 의 충전전압 상승시간은 측정치에서와 같이 주파수 증가에 따라서 선형적으로 감소하는 패턴을 갖는다.

$$V_{peak} = -k(f_r - a) + b, k \propto L_{m2} / L_{m1}$$

$$V_{out} \approx I_{Lm} \omega L_m \frac{N_2}{N_1} = 2\pi f_{sr} I_{Lm} L_m n (V_{peak})$$

$$\frac{V_{out}}{V_{IN} n} \omega L_m = \frac{2\pi f_s V_{out} L_m}{V_{IN} n} \approx \kappa \approx 13.5 \quad (8)$$

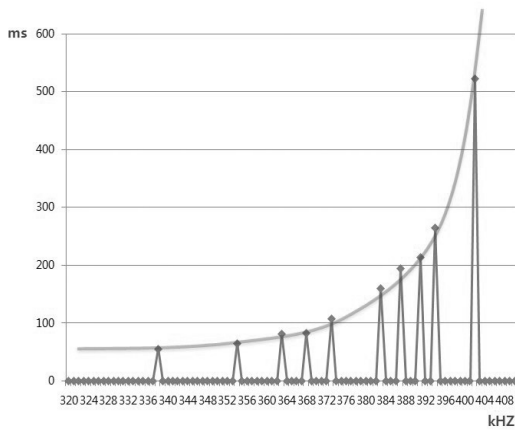


Fig. 8 Charging time of capacitor Vs. frequency ($C_b = 34\mu\text{F}$, $V_{\text{max}} = 240\text{V}$, $L_{m2} = 4.5\text{mH}$)

따라서 펄스 출력전압 V_{out} 이 결정되어야만 출력 측 커패시터 C_b 에 충전되는 전압의 시정수 t 가 결정됨으로, 아래의 수식 (9)에서와 같이 표현할 수 있다.

$$V_c = V_{\text{peak}}(1 - e^{-\frac{t}{Z_{\text{trans}} C_b}}), \text{ 여기서}$$

$$V_{\text{peak}} = V_{\text{out}} \text{이라 가정하면,}$$

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{IN}n}} \approx \kappa \text{에서,}$$

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{IN}n} \cdot \kappa}{\omega L_m} \quad (9)$$

따라서 t 에 대해서 정리하면 식 (10)과 같이 결정된다.

$$t = Ln \left(\frac{V_c \cdot \omega L_m}{V_{\text{IN}n} \cdot \kappa} - 1 \right) Z_{\text{trans}} C_b \quad (10)$$

최대 충전시간 t 는 자가 발진의 최대 주기로 정의할 수 있으며, $1/t$ 는 방전발진 주파수 f_i 로 놓을 수 있다. 다만, 설계 시 구동 주파수 f_s 는

트랜스포머의 자가 공진주파수를 피하여 구동해야 돌발적인 과전압, 과전류 상태를 막을 수 있으며, 상기 출력전압 설계 공식에 따라서 구현이 가능한 점을 최적화하여 설정하여야 한다.

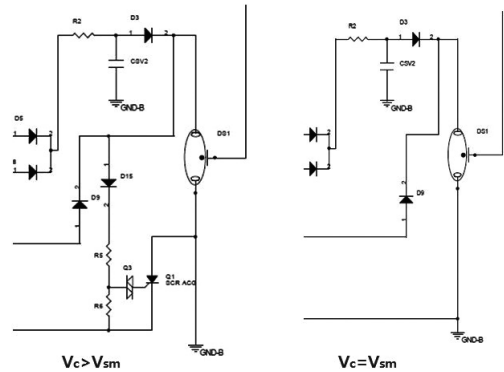


Fig. 9 Circuit for increasing Arc discharge voltage

따라서 트랜스포머를 설계할 때, t 를 결정하면, 그에 맞는 각 정수의 결정을 통하여 방전관을 포함한 시스템의 자가 발진주파수를 결정할 수 있는 회로구조를 가짐으로, Micro controller unit(MCU)와 스위치소자 및 스위치 드라이버의 구비를 없애거나 최소화할 수 있으므로, 시스템의 공간적, 경제적 효율을 상승시킬 수 있다는 장점이 있다.

또한, 방전전력을 종래와 같이 방전관 양단 전압을 상승시키는 방법으로 통전 전류량을 강제로 늘리는 방법을 사용하지 않고, 예비방전 유지전압과 같거나 약간 높은 전압에 커패시터 뱅크의 충전전류량을 통한 방전제어방식으로 반복되는 자가 발진방전을 통해 방전관의 수명을 향상시키고, 과전류에 따른 방전관의 높은 발열, 파괴와 같은 안전상의 문제에 있어서도 유리한 방식이라 하겠다.

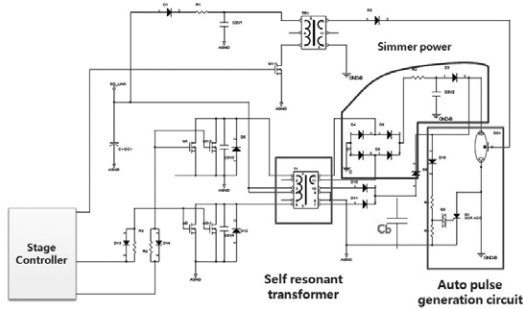


Fig. 10 Power stage for operating xenon flash lamp of self oscillating

3. 실험

저속 자가 발진을 이용하여, 40Hz~0.2Hz까지 다양한 충전주기를 이용한 방전특성을 실험해 보았다. 커패시터의 충전전압은 V_{peak} 보다 적은 값에서 충전하며, 실험에서는 무부하시 V_{peak} 1.6kV에 $V_c = V_{sm}$ 인 240V로 충전이 완료됨과 동시에 방전되도록 설계 및 회로정수를 부여 하였다. 이때 충·방전 주기에 따른 자가 발진 주파수는 계산식과 같이 일치함을 실험을 통하여 확인하였다.

C_b 값을 각각 25uF, 50uF, 110uF로 하여 자가 발진을 일으키는 충전주기 및 아크 방전개시 전압, 방전 종료 전압, 예비방전 유지 전압을 비교하여 본론의 주장과 동일함을 보였으며, 또한 방전관에서 방출되는 빛 에너지의 량을 통해서 방전개시 전압을 예비방전유지전압과 동일한 값으로 유지 하면서 전류량만으로 광량을 충분히 조절할 수 있음을 보였으며, 실험 결과는 다음과 같다.

Fig. 11은 본 연구를 통하여 설계 및 구현한 전원장치를 통하여 예비방전(Fig. 11의 하)을 시작 하고, 이후 자가발진을 통하여 아크방전(Fig.

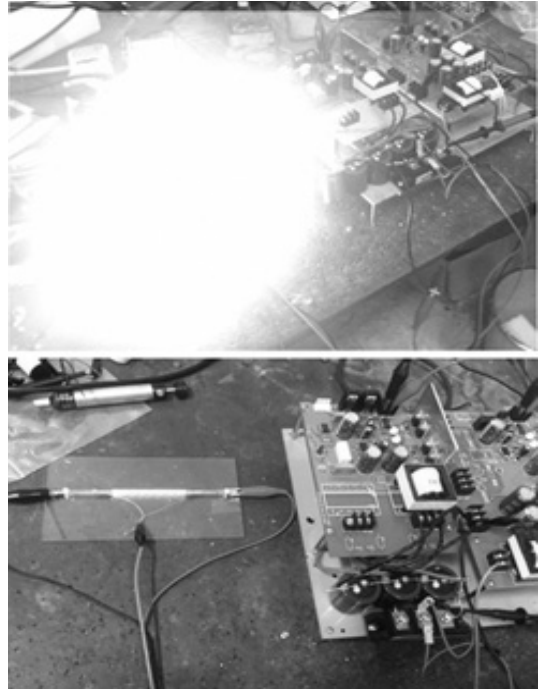


Fig. 11 Experiment of discharging the xenon flash lamp

11의 상)을 통한 발광을 보여주는 그림이다.

실험을 통하여 광출력 패턴을 파악하면, Fig. 12와 Fig. 13과 같이 용량의 증가에 대하여 광

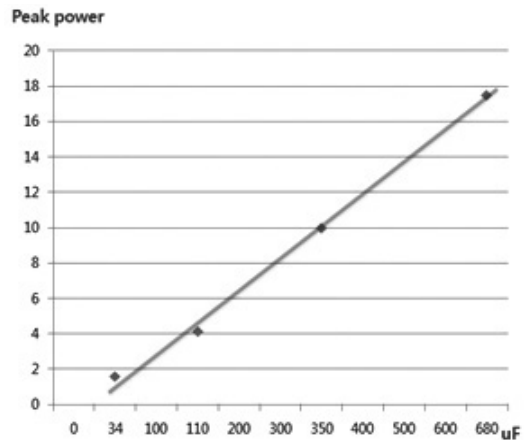


Fig. 12 Light peak power in proportion to capacitance values

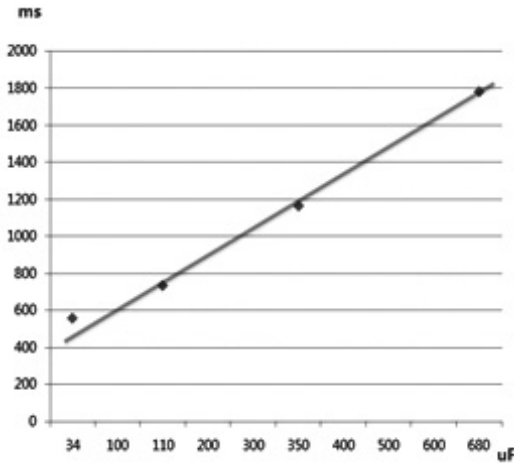


Fig. 13 Light pulsed width in proportion to capacitance values

펄스 출력 Peak Power와 광 펄스의 Pulse Width가 증가함을 알 수 있으며, Pulse Width는 용량의 증가와 함께 증가기울기가 감소하며, 광 Pulse 출력은 기울기가 증가하는 패턴을 보인다.

4. 비검사대상 수상레이저기구 안전평가 기준 조사

형식승인·검정 및 우수사업장 인증에서 그 대상으로 하고 있으나 관련 형식승인시험기준 및 시험방법이 없는 비 검사대상(무동력) 수상 레이저기에 적용할 수 있는 안전평가 기준을 수상 레이저사업장 설문 및 문헌 및 인터넷 등을 이용해 조사를 수행하여 보았다.

조사결과, 표준화되게 적용할 수 있는 안전평가기준은 카누 및 카약, 스쿠터, 호버크래프트 관련 기준이 있었다. 카누 및 카약의 경우, KSVISO 6185-1 및 ABYC H-29 기술기준이

있었으며, 스쿠터의 경우 국내 A사에서 자체성능 평가로 정격출력측정, 효율측정, 방수측정, 내부 식성 특정, 제품의 중량 측정을 수행하고 있었다. 호버크래프트의 경우, 해양수산부에서 제정한 '공기부양정의 구조 및 설비 등에 관한 기준' 이 있었다.

5. 결 론

이상과 같은 실험을 통하여, UV 발생 시스템 장치의 전원장치로 40~50pps급 제논 방전 램프용 전원공급장치가 적절함을 보였다.

특히, 방전속도를 빨리하기 위해서는 전원 공급장치의 전류용량만 증가시키면 되며, 여기에 부가하여 방전관의 최대방전전류 용량이 적합하도록 커패시터 बैं크의 용량만 적절히 가변하면 전류조절과 속도조절을 동시에 달성하여, 수십 pps급의 소용량 UV 펄스 발생 장치를 콤팩트하게 설계할 수 있도록 하는 하나의 방법으로 제안한다.

아울러, 100pps급 이상의 고속발전에서도 예비방전과 아크방전이 안정적으로 유지될 수 있도록 하는 심화연구가 필요할 것으로 판단 한다.

후 기

본 연구는 선박안전기술공단의 2013년도 자체연구사업으로 추진하였음을 밝힙니다.

참고 문헌

- (1) J. B. Trenholme and J. L. Emmet, "Proceeding of Xenon Flashlamp model for performance prediction", International Conference on High Speed Photography, pp. 229, 1970
- (2) Sang-Gyu Cheon, Dae-Won Park, and Gyung-Suk Kil, "Development of an Ultra-Violet lamp and a ballast for ship's ballast water treatment," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 35, no. 5, pp. 675-681, 2011 (in Korean)
- (3) Tae-Sung Pyo, Sang-Gye Cheon, Dae-Won Park, Sung-Kuk Choi, Seung-Yeon Kim, and Gynug-Suk Kil, "Design and fabrication of a ballast water treatment system using UV lamps," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 33, no. 6, pp. 952-958, 2009 (in Korean)
- (4) Hatem Elloumi, Georges Zissis, Thierry Berthier, and Jean Jacques "Damelin court. "Time-dependent behavior of a pulsed high power xenon flashlamp". Application to the mega-Joule laser pumping. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, vol 84, no. 4, pp. 361-369, 2004
- (5) Steven CHU and Robert W. Smith, "A Reliable thyatron-switched flashlamp-pumped dye laser," Optics Communications, Vol. 28, No.2, pp. 221-226, 1979
- (6) Nan-Jing Zhao, and Wen-Qing Liu. "Study of the charging circuit of a pulsed solid-state laser power supply: A new concept of high charging efficiency and realization," Optics & Laser Technology. vol. 41, no.4, pp. 461-469, 2009
- (7) Jung-Hwan Hong, Kum-Young Song, Hyun-Ju Chung, Jong-Han Jung, Whi Young Kim, Uk Kang, and Hee-Je Kim. "Long pulse generation technology of solid-state laser adopting a new real time multi-discharge method," Optics & Laser Technology, vol. 34, no.3, pp. 203-207, 2002
- (8) Hee-Je Kim, Eun-Soo Kim, and Dong-Hoon Lee. "The development of a high repetitive and high power Nd:YAG laser by using a zero-current switching resonant converter," Optics & Laser Technology, vol. 30, no. 3-4, pp. 199-203, 1998.
- (9) Piero Mazzinghi, and Fabrizio Margheri. "A short pulse, free running, Nd:YAG laser for the cleaning of stone cultural heritage," Optics and Laser in Engineering, Vol. 39, no. 2, pp. 191-202, 2003
- (10) Simon S. Ang., Power Switching Converters, Marcel Dekker, Inc., 1995
- (11) Ned Mohan, Tore M. Undeland, and

- William P. Robbins, *Power Electronics, Converters, applications, and design*, Hoboken: John Willey & Sons, Inc. 1989
- (12) Abraham I. Pressman, Keith Billings, and Taylor Morey. *Switching Power Supply Design*, Third Edition. New York: The McGraw-Hill Companies, 2009
- (13) Dr. In-Hwan Oh, *Analysis of a Resonant Type High Voltage Fly-back Converter in a CRT Horizontal Deflection Circuit and its High Voltage BJT Selection Guide-Line*, AN9009, Fairchild Korea Semiconductor Inc. Sept. 19, 2000, available: <http://www.fairchildsemi.com/an/AN/AN-9009.pdf>
- (14) G. Hartel, M. Kettlitz, H. Schopp, and F. Serick. "Pulsed alkali pump light sources for Nd:YAG lasers," *Optic & Laser Technology*, Vol. 28, No. 6, pp. 437-443, 1996
- (15) Kangin Lee, Hyeon Cheor Lee, Joon-Young Cho, Jae-Cheul Lee, and Jonghoon Yi. "Passively Q-switched, high peak power Nd:YAG laser pumped by QCW diode laser," *Optics & Laser Technology*, vol 44, no. 7, pp. 2053-2057, 2012
- (16) P.A. Forrester, V.J. Alexander, and H.W. Evans, "Pocket-size Nd-YAG pulsed laser," *Optics & Laser Technology*, vol. 6. no. 4, pp. 174-176, 1974