

영상증폭관을 위한 고전압 전원장치 개발

鄭世教*, 林廷圭**, 權大煥***, 李大植†

Development of High Voltage Power Supply for Image Intensifier Tube

Se-Kyo Chung, Jeong-Gyu Lim, Dae-Hwan Kwon and Dae-Sik Lee

요 약

본 논문에서는 영상증폭관 (image intensifier tube) 구동을 위한 초소형·경량의 고전압 전원장치의 개발에 대하여 기술하였다. 영상증폭관은 미세한 빛을 증폭하여 야간에도 물체를 식별할 수 있도록 하며, 휴대용 야간 투시경에 사용된다. 영상증폭관을 구동하기 위해서는 배터리 전원을 승압하여, 작은 사이즈에서 수천 볼트의 고전압을 발생하는 전원장치가 필요하다. 본 논문에서는 이를 위한 고전압 전원장치의 설계와 제작에 대해 설명하였으며, 시작품에 대한 실험을 통하여 성능을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper describes the development of a miniature high voltage power supply for driving an image intensifier tube (IIT). The IIT is used for portable night vision devices to observe an object in the dark. A small-sized high voltage power supply generating thousands volts from the battery power source is needed to drive the IIT. This paper presents the design and implementation of the high voltage power supply for the IIT. The experimental results are provided to verify the operation of the developed power supply.

Key Words : Image intensifier tube, Night vision device, High voltage power supply, Voltage multiplier, Push-pull resonant converter

1. 서 론

야간에 물체의 관측이 가능한 야시장비는 광증폭 장비 (image intensified system)와 열상 장비 (thermal imaging system)로 구분된다. 광증폭 장비는 야간의 자연광 (별빛, 달빛과 천공광)이나 인공광 (조명, 담뱃불 등)의 미소한 빛을 감지하여 영상증폭관 (image intensifier tube; IIT) 이라는 특수한 진공관에서 전자로 변환하고, 이를 수천, 수만 배로 증폭시켜서 형광

화면상에 밝게 표시하는 것이다. 이러한 광증폭 장비는 섬광이나 조명 등 실제 전장 환경에서 사용이 제한되고, 기상 조건 및 월광 조건에 따라 성능이 크게 영향을 받지만 소형 경량화가 가능하며, 그림 1과 같은 개인 휴대의 야간투시경으로 군사적 사용과 기술 발전이 계속 진행되고 있다^[1].

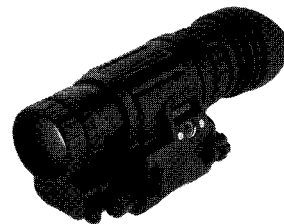


그림 1 단안형 야간 투시경
Fig. 1 Single lens night vision goggle

†교신저자 : 정회원, 대구대 전자공학부 교수
E-mail : dslee@daegu.ac.kr

*정회원, 경상대 전기전자공학부 교수

**정회원, 경상대 제어계측공학과 박사과정

***정회원, 대구대 전자공학과 석사과정

접수일자 : 2008. 9. 1 1차 심사 : 2008. 10. 28

심사완료 : 2008. 12. 26

영상증폭관의 내부 구조는 그림 2와 같으며, 유입되는 빛을 전자로 변환하는 Photocathode, 고전압에 의해 발생된 전자장을 이용하여 전자를 증폭하는 Microchannel plate (MCP), 형광물질이 도포된 Screen으로 구성된다.

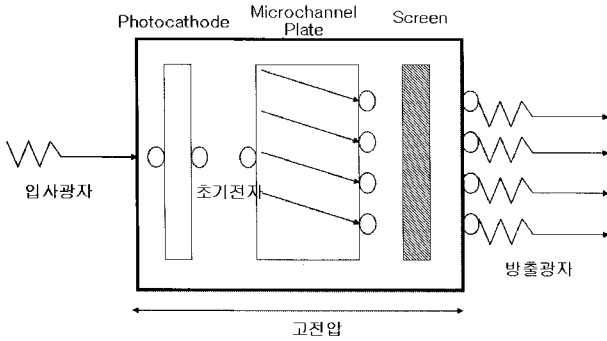


그림 2 영상증폭관의 구조
Fig. 2 Structure of image intensifier tube

이러한 영상증폭관의 구동을 위해서는 통상 Screen에 4,000~6,000V, Photocathode에 600~900V의 일정 전압이, MCP에는 600~1000V 정도의 가변 가능한 고전압이 인가되어야 한다. 그리고 병사의 헬멧 등에 부착하여 사용이 가능해야 하므로 소형 (직경 약 3.5cm 원통형), 경량 (무게 약 30g)이어야 한다^[3]. 그 뿐 아니라 야간투시경의 밝기 조절을 위한 전압제어 기능, 과도한 빛의 유입 시 시력을 보호하기 위한 과전류 제한 기능 등이 필요하다. 그리고 배터리를 전원으로 사용하므로 전력 소모를 최소화하기 위한 설계가 이루어져야 한다. 따라서 본 논문에서는 이러한 영상증폭관용 고전압 전원장치의 개발과정과 실험결과를 제시한다.

2. 영상증폭관용 고전압 전원장치

2.1 고전압 전원장치의 사양

영상증폭관용 고전압 전원장치의 블록 다이어그램은 그림 2와 같다. 본 연구에서 개발한 고전압 전원장치의 사양은 표 1과 같다. Photocathode와 Screen 전압은 고정 전압이며, MCP 전압은 밝기제어를 위해 600~850V 범위로 제어가 가능해야 한다. 영상증폭관용 고전압 전원장치는 과도한 빛 입력에 대해 2가지 종류의 보호회로를 가진다. 첫째로 Screen 전류를 검출하여 전류의 크기에 따라 MCP 전압을 제어하여 밝기를 자동으로 제어하는 Automatic brightness control (ABC) 기능을 가지며, 다음으로 외부에서 과도한 빛

이 유입될 경우 Photocathode의 전압을 제한하는 Bright source protection (BSP) 기능을 가진다. 각 기능에 대한 동작 특성은 다음 절에서 설명한다.

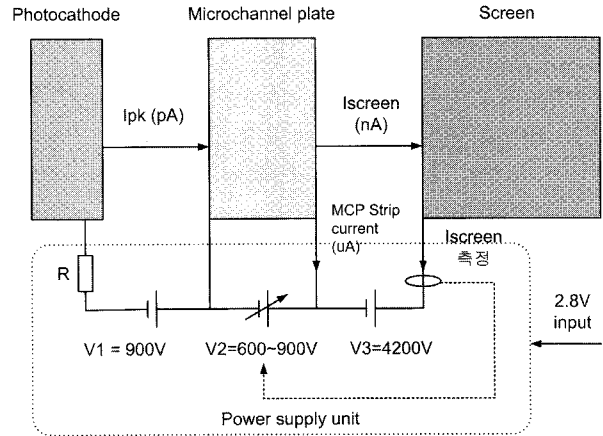


그림 3 영상증폭관 전원장치 블록 다이어그램
Fig. 3 Block diagram of IIT power supply

표 1 개발된 고전압 전원장치 사양
Table 1 Spec. of proposed HVPS

항 목	값	비고
Photocathode 전압 (V1)	4200V	고정
MCP 전압 (V2)	600~850V	가변
Screen 전압 (V3)	900V	고정
입력전압	2.8V	
입력전류	22mA	
보호기능	ABC, BSP	
크기 (외경)	3.5cm	
무게	30g 이하	

2.2 고전압 발생회로

일반적으로 X-ray, CRT 응용에 사용되는 고전압 전원장치에는 높은 권선비의 플라이백 변압기(FBT)를 사용한 플라이백(Flyback) 컨버터가 많이 사용된다. 플라이백 컨버터는 구성이 간단하고 시비율을 제어하여 높은 전압을 쉽게 얻을 수 있다. 그러나 높은 전압 비를 얻을 경우 손실이 매우 커서 표 1에 제시된 사양 중 입력전류 제한 조건을 충족하기가 매우 어렵다. 따라서 본 논문에서는 변압기의 기생성분에 의한 공진을 이용하여 입력전류를 최소화 하는 푸시풀 공진형 컨버터 토폴로지를 사용하였다.

그림 4는 배터리의 전압을 푸시풀 공진형 컨버터와 Voltage multiplier를 이용하여 고전압으로 변환하는 회로를 나타내고 있다. 먼저 배터리 전압을 1차측 인덕터와 변압기 및 Voltage multiplier의 등가 커패시터를 이용하여 공진 시킨 다음 고전압 변압기를 통해 200[V] 정도의 고주파 교류전압으로 변환한다. 이때 공진회로의 주파수는 다음과 같다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_{eq}}} \quad (1)$$

여기서,

$$L_{eq} = \frac{L_r L_m}{L_r + L_m} \quad (2)$$

이고, L_r 은 1차측 인덕터, L_m 은 자화인덕턴스, C_{eq} 는 변압기와 Voltage multiplier의 1차측 환산 커패시턴스이다. 일반적인 변압기에서는 자화인덕턴스가 매우 커서 공진회로에 영향을 주지 않지만 본 연구와 같이 초소형, 고전압 변압기의 경우 1차 측 권선 수에 제한이 있어 자화인덕턴스를 고려해야 한다.

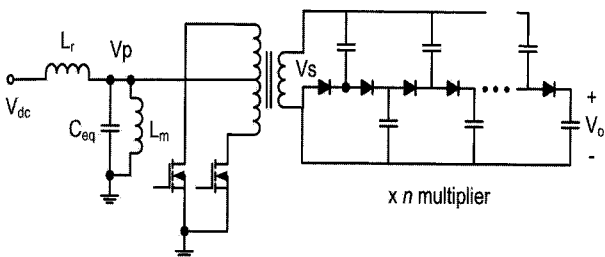


그림 4 고전압 발생회로
Fig. 4 High voltage generation circuit

변압기의 2차 측 전압은 Voltage multiplier를 이용하여 정류 및 체배하였다. Voltage multiplier는 고전압 다이오드와 커패시터로 구성되어 있으며, 회로의 구성에 따라 직렬형과 병렬형, 전파 및 반파 Multiplier가 있다. 본 연구에서는 그림 5와 같은 병렬형 반파 Multiplier를 사용하였다. 병렬형 Multiplier는 커패시터 전압이 체배 수가 증가할수록 커져 고전압 커패시터가 필요하다는 단점이 있지만, 직렬형에 비해 사용되는 커패시터 값이 작고 부하전류 변화에 출력전압 변동이 작다는 장점이 있다^{[4][7]}. 그림 6은 제안된 고전압 발생회로의 각 부분의 파형을 나타낸 것이다.

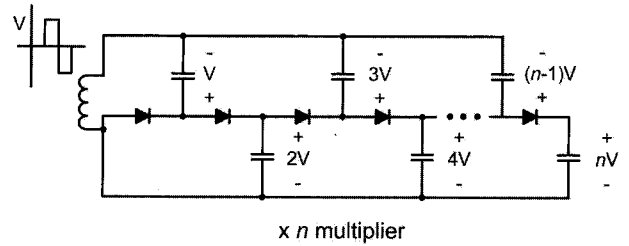


그림 5 병렬형 반파 Voltage multiplier
Fig. 5 Parallel half-wave voltage multiplier

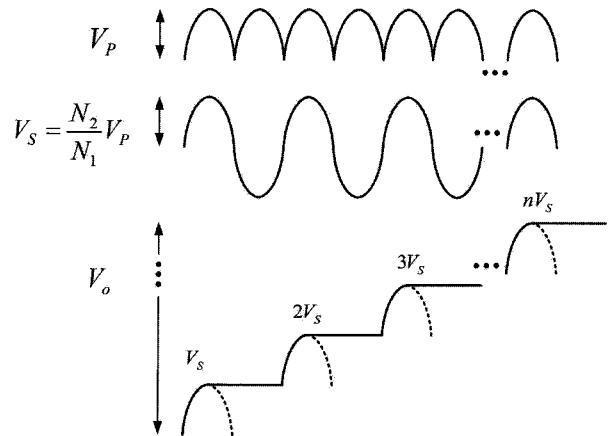


그림 6 제안된 회로의 주요 동작 파형
Fig. 6 Key operation waveforms of the proposed circuit

본 연구에서는 4200[V] 전압을 얻기 위해서 24배의 Voltage multiplier를, 900[V] 전압을 위해서는 4배의 Voltage multiplier를 사용하였다. Voltage multiplier는 체배 수가 증가할수록 전압강하가 커지며, 전압강하는 다음과 같이 부하전류 I_o , 커패시터 값 C , 체배 수 n , 주파수 f 의 함수로 나타낼 수 있다^[4].

$$\Delta V_o = \frac{I_o \left[n^3 + \left(\frac{9n^2}{4} \right) + \left(\frac{n}{2} \right) \right]}{12fC} \quad (3)$$

2.3 출력전압의 제어

고전압 전원장치의 출력전압 V_1, V_2, V_3 의 제어를 위해서는 Linear 타입의 Low drop out (LDO) 레귤레이터를 사용하였다. Linear 타입의 레귤레이터는 스위칭 레귤레이터에 비해 효율이 낮지만, 회로가 간단하고 인덕터가 필요치 않아 소형화가 가능하다. 그림 7은 LDO 레귤레이터를 이용한 출력전압의 제어방법을 나타내고 있다. LDO 레귤레이터에서는 출력전압을 궤환하여 1차측 직류전압의 크기를 제어하며, 결과적으

로 1차 측 공진전압 V_p 의 크기가 제어되어 출력전압의 제어가 가능해진다. 출력전압의 검출을 위해 변압기의 보조권선을 이용하였으며, 이를 정류하여 사용하였다.

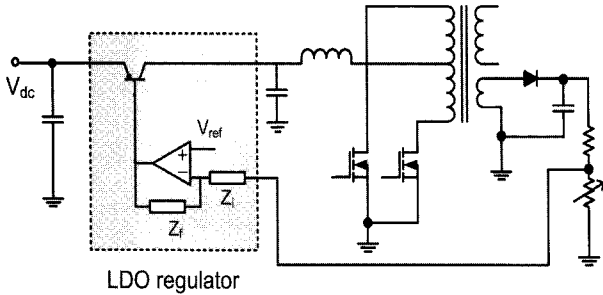


그림 7 출력전압 제어회로
Fig. 7 Output voltage control circuit

2.4 Automatic Brightness Control (ABC)

ABC 기능은 영상증폭관용 고전압 전원장치에서 가장 중요한 기능 중의 하나로, 야전에서 조명탄, 화염발생과 같이 과도한 빛이 유입될 때, MCP 전압을 조절하여 영상의 밝기를 일정하게 유지하는 역할을 한다. 따라서 영상증폭관에서 최종적으로 영상을 표시하는 Screen에 흐르는 전류를 피드백 하여 설정된 전류 이상이 흐르게 될 경우 MCP 전압을 줄이거나 차단하게 된다. ABC의 기준 Screen 전류는 군수규격에 규정되어 있다^[3]. 그림 8은 본 연구에서 적용된 ABC회로를 나타내고 있다.

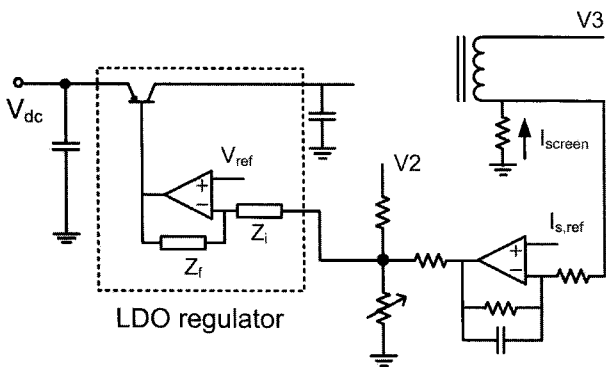


그림 8 ABC 회로의 구성
Fig. 8 Configuration of ABC circuit

Screen에 흐르는 전류는 nA급이며, 저항을 이용하여 Screen 전류(I_{screen})를 측정 후 전류 기준값($I_{s,ref}$)과 비교하여 그 값을 MCP 전압(V_2) 제어용 LDO 레귤레이터에 피드백하여 MCP 전압을 제어 또

는 차단하게 된다. Screen 전류가 nA급이므로 전류측정을 위해서는 $M\Omega$ 단위의 저항이 필요하다. 따라서 이 회로에 사용되는 OP 앰프의 입력저항과 회로의 저항 값은 충분히 커야한다. 본 연구에서 Screen 전류측정을 위해 사용한 OP 앰프는 MAX4162이며, 입력저항은 $10 T\Omega$ 이상의 값을 가지고 있다.

2.5 Bright Source Protection (BSP)

BSP 기능은 ABC 기능과 함께, 사용자 눈을 보호하기 위한 것으로, 과도한 빛이 유입될 때 전자의 발생을 억제하는 역할을 한다. 이를 위해 Photocathode의 입력저항을 측정하여 그 값이 기준 이하로 감소하면 V_1 을 낮은 전압으로 줄여 전자의 발생을 억제한다. 그림 9는 본 연구에 사용된 BSP 회로를 나타내고 있다.

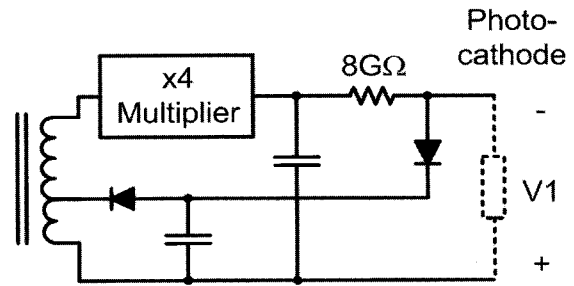


그림 9 BSP 회로의 구성
Fig. 9 Configuration of BSP circuit

2.6 고전압 변압기

영상증폭관용 고전압 전원장치의 개발에서 가장 핵심적인 부분이 소형의 고전압 변압기의 설계이다. 고전압 변압기는 2차 측 권선의 턴 수가 많으므로 권선 커패시턴스가 커지고, 권선비가 높으므로 2차 측 권선 커패시턴스를 1차 측으로 환산할 경우 매우 큰 값이 된다. 따라서 변압기의 공진 주파수와 Q값이 낮아지게 된다. 본 연구의 경우 기존의 고전압 플라이백 변압기(FBT)와 달리 크기가 매우 작아 2차 측 권선의 섹션을 많이 둘 수 없어 2개의 섹션을 두어 변압기를 제작하였다. 변압기 코어는 Magnetics사의 POT코어를 사용하였다^[6].

고전압 변압기는 매우 작은 사이즈에 고전압이 인가되므로 변압기의 절연과 누설 전류의 최소화가 필수적이다. 따라서 권선의 전위차가 최소가 되도록 제작을 해야 하며 저점도의 Epoxy를 사용하여 충분히 절연을 해야 한다. 그림 10은 제작된 변압기의 사진이다.

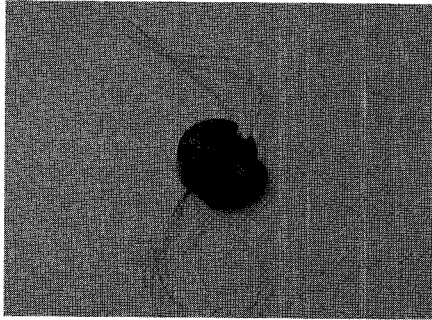


그림 10 고전압 변압기
Fig. 10 High voltage transformer

3. 고전압 전원장치의 제작 및 실험

3.1 고전압 전원장치의 제작

휴대용 영상증폭관용 고전압 전원장치는 표 1에 주어진 것과 같이 매우 작은 사이즈에 집적되어야 하므로 제작이 매우 어렵다. 그림 11은 본 연구에서 제작된 고전압 전원장치의 케이스를 나타낸 그림이며, 환형의 공간에 전원장치가 설치되어야 한다.

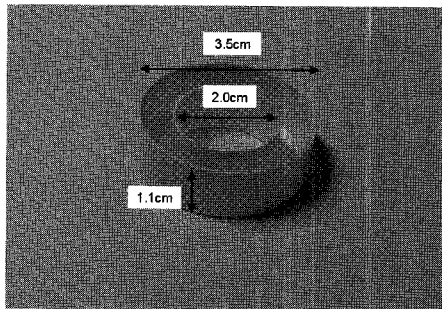


그림 11 고전압 전원장치의 크기
Fig. 11 Size of high voltage power supply

제작된 회로의 주요 파라미터는 표 2에 정리하였다.

표 2 제작된 회로의 주요 파라미터
Table 2 Parameter of developed circuit

항 목	값
1차측 인덕턴스 (L_r)	330 μ H
1차측 자화인덕턴스 (L_m)	151 μ H
1차측 등가 커패시턴스 (C_{eq})	520nF
변압기 권선 비 ($N_1:N_2$)	1:52
2차측 Voltage multiplier 커패시턴스 (C_s)	50pF

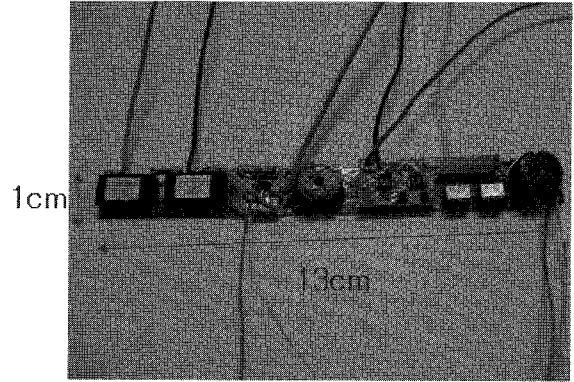


그림 12 제작된 고전압 전원장치 (Molding 전)
Fig. 12 Implemented high voltage power supply (Before molding)

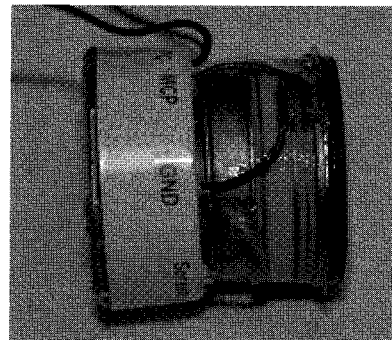


그림 13 영상증폭관과 결합된 고전압 전원장치
Fig. 13 High voltage power supply assembled to IIT

그림 12은 제작된 고전압 전원장치의 몰딩 전 사진을 나타내고 있다. 2개의 PCB로 구성되어 있으며, 둥글게 말아서 그림 11에 나타낸 케이스에 장착된다. 케이스에 PCB를 장착한 후 다우코닝사의 저점도 실리콘을 사용하여 몰딩을 하였다.

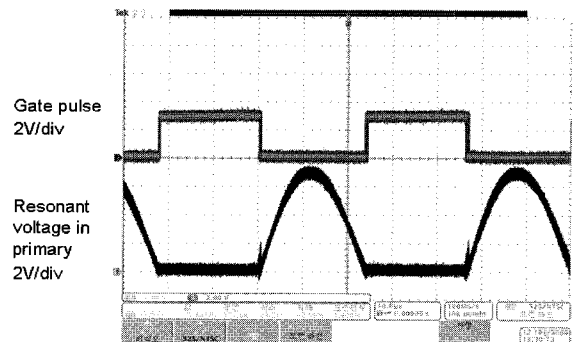


그림 14 게이트 신호 및 1차 측 공진전압 (2V/div)
Fig. 14 Gate pulse and resonant voltage in the primary side

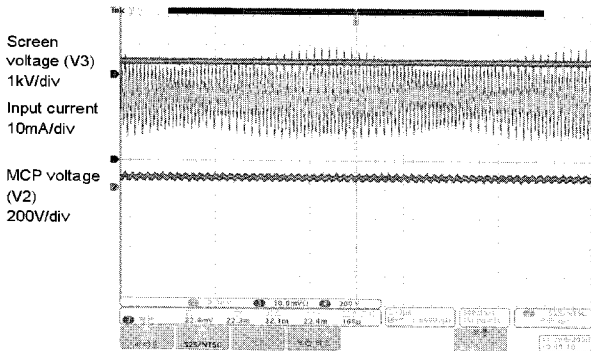


그림 15 Screen 전압 (1kV/div), 입력전류 (10mA/div), MCP 전압 (200V/div)

Fig. 15 Screen voltage (1kV/div), Input current (10mA/div), MCP voltage (200V/div)

3.2 고전압 전원장치 실험 결과

그림 14와 15에서는 제작된 고전압 전원장치의 실험 결과를 나타내었다. 그림 14는 게이트 신호와 1차 측 공진회로의 전압을 나타내고 있다. 회로의 공진주파수는 21.7kHz 이며 공진회로 전압의 최대값은 7V이다. 그림 15는 Screen 전압, 입력전류, MCP 전압을 나타내고 있다. Screen 전압 V3는 4300V를 나타내며, V2는 -700V, 입력전류는 23mA를 나타내고 있다. V1은 출력저항이 8GΩ 이므로 일반적인 오실로스코프로 측정이 불가능하며, TΩ급의 입력저항을 가진 전압계가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 군사용 야간 투시경에 사용되는 영상 증폭관의 구동을 위한 고전압 전원장치의 개발에 대해 기술하였다. 영상증폭관 구동용 전원장치의 구조와 고전압 발생을 위한 Push-pull resonant converter 회로, 전압제어 방법, 보호회로, 변압기 제작 등을 설명하였다. 제안된 회로를 시작으로 제작하였으며 Gen. III 형의 영상증폭관에 적용하여 실험한 결과, 영상증폭관의 구동에 필요한 수준인 V1=-900V, V2=-700V, V3=4300V의 출력전압이 발생됨을 볼 수 있었다. 향후 과제로 고전압 전원장치의 소모전류를 최소화하여 배터리의 사용시간을 증가시키는 연구가 필요할 것이다.

본 논문은 대구대학교 교내연구비 지원에 의함

참 고 문 헌

[1] 홍석민. (2006). 전자광학 영상센서. 물리학과 첨단기술

1/2월호. 11-18.

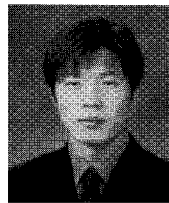
[2] Photonics. Introduction to Image Intensifier Tubes.
 [3] MIL-P-49452, Military Specification, Power Supply, 18mm Microchannel wafer, Gen III, 1989.
 [4] VMI. Multipliers Design Guide section 13. pp. 213-294.
 [5] C. T. McLyman. (1988). Transformer and Inductor Design Handbook. Marcel Dekker.
 [6] MAGNETICS. Power Design section 4.
 [7] P. M. Lin and L. O. Chua, "Topological generation and analysis of voltage multiplier circuits", *IEEE Trans. Circuit and systems*, Vol. 24, No. 10, pp. 517-530, 1977.
 [8] F. Belloni, P. Maranesi, and M. Riva, "Parameters optimization for improved dynamics of voltage multipliers for space", *Conf. Rec. IEEE PESC 2004*, pp. 439-443, 2004.

저 자 소 개



정세교(鄭世敎)

1966년 11월 26일생. 1989년 경북대 전자공학과 졸업. 1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1997년 동대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1997년~현재 경상대 전기전자공학부 교수 및 공학연구원 연구원. 1999년 2월~2000년 3월 일본 큐슈공업대 객원교수. 2002년 2월~2003년 2월 미국 Texas A&M 대학 Visiting Scholar.



임정규(林廷圭)

1977년 6월 4일생. 2003년 경상대 공대 전기전자공학부 졸업. 2005년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2004년~현재 동 대학원 제어계측공학과 박사과정.



권대환(權大煥)

1979년 3월 7일생. 2004년 대구대 정통대 정보통신공학부 졸업. 2006년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사).



이대식(李大植)

1960년 5월 5일생. 1982년 경북대 전자공학과 졸업. 1984년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1994년~현재 대구대 전자공학부 교수. 2000년 9월~2001년 8월 미국 PSU 대학 Visiting Scholar.