

16kW 회전 Anode형 모노블럭 X-선 발생장치

金學成[†], 吳俊龍^{*}, 金淵忠^{**}

A 16kW Rotating Anode type Monoblock X-ray Generator

Hackseong Kim, Junyong Oh and Yuenchung Kim

요 약

본 논문은 회전형 대용량 진단 X-선 발생장치를 모노 블록 형태로 설계, 병원의 모바일 진단장치나, 산업용 X-선 장치로에 적용이 가능한 16kW급 회전 Anode형 모노블럭 X-선 발생장치에 관한 연구이다. 본 장치는 X-선 발생을 위해 회전 Anode 형의 X-선관을 사용하였고, X-선관의 Anode의 회전을 위한 로터를 구동할 수 있는 로터 구동회로를 추가 하였다. 고주파 고전압용 인버터에는 IGBT(600V/300A)소자를 100kHz로 고주파 스위칭 함으로서 고전압 변압기를 비롯한 고전압 발생부의 크기와 무게를 최소화하였다. 또한, 기존의 16kW급 대용량 진단 X-선 발생장치를 X-선관과 고전압부를 일체화한 모노블럭 형태로 설계, 제작하여 부하변동에 따른 X-선 관전압과 관전류의 동작특성을 실험을 통하여 입증하였다.

ABSTRACT

This paper designs mono block type with rotating high power radiography x-ray generator and studies 16kW X-ray generator possible to adapt hospital mobile radiography and industrial X-ray equipment and design. This equipment uses rotating anode type x-ray tube at high voltage generator to generate x-ray and adds rotor operating circuit to operate rotor of x-ray tube. The size of high voltage transformer and high voltage generator is minimized by high voltage high frequency inverter has 100kHz switching frequency. Also this paper shows result of x-ray tube voltage and tube current correspond to variable load.

Key Words : Mono block, Radiography x-ray generator, High voltage generator, Rotating anode type x-ray tube, High voltage transformer

1. 서 론

기존의 10kW 미만의 소용량 모노 블록형 휴대용 X-선 발생장치는 소형, 경량화 할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 모노 블록형 탱크의 X-선관 애노드 타겟이 고정형이고 또한, X-선관 사양과 이에 따른 X-

선 출력이 낮아 주로 몸집이 작은 동물이나 말의 발굽과 같은 곳을 촬영하는데 주된 응용이 이루어졌다. 이로 인해 인체 진단용 적용은 한계를 가지고 있었다. 그러나 최근에는 X-선관 및 스위칭 소자의 급속한 발달로 인해 모노 블록형 X-선 발생장치의 소형, 경량화 장점을 유지 하면서도 X-선 출력을 높일 수 있는 장치의 개발 및 제품화가 활발히 이루어지고 있다^[1]. 본 논문에서 제안한 16kW 모노 블록형 X-선 발생장치는 회전 Anode형의 대용량 장치이면서도 위의 조건을 만족한다 할 수 있다. 기존 대용량 모바일 형태의 진단 X-선 발생장치는 X-선관과 고전압 발생부가 분리되어 있기 때문에 전력을 공급하기 위한 고가의 고전압

[†]교신저자 : 정희원, 동양공전 자동화시스템과 부교수

E-mail : kimhs@dongyang.ac.kr

^{*}정희원, (주)에코트론 책임연구원

^{**}정희원, (주)에코트론 연구소장

접수일자 : 2005. 9. 27

1차 심사 : 2005. 10. 20

심사완료 : 2005. 11. 1

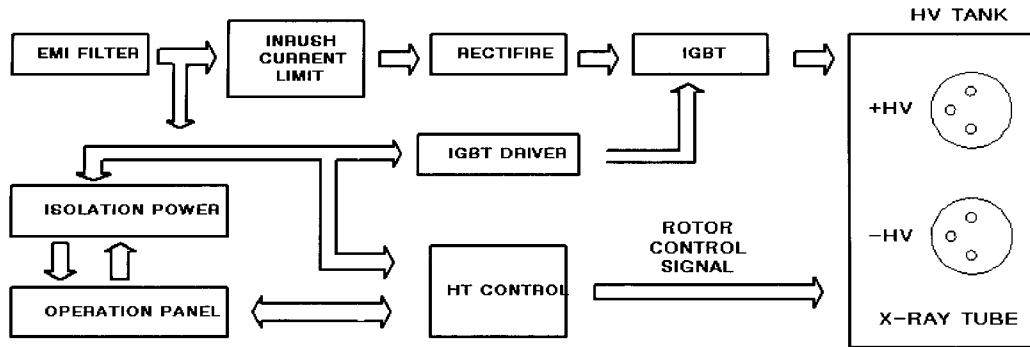


그림 1 16kW 회전 Anode형 X-선 발생 시스템
Fig. 1 16kW Rotating Anode Type X-ray System

케이블이 필요하고 이러한 점이 제품의 크기 및 가격을 상승 시키는 요인이 되었다. 그러나 본 논문에서는 모노탱크 안에 회전 애노드형 X-선관과 고전압 발생부를 일체화 시켜 고전압 케이블을 제거함으로써 제품의 크기를 크게 줄일 수 있다. 이에 따라 본 논문에서는 상용전원으로 병원 내를 자유로이 이동하거나, 움직임이 심한 동물의 순간 X-선 촬영을 할 수 있는 회전형 애노드 X-선관 탑재형 대용량 모바일 진단 X-선 장치의 개발을 소개하고자 한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 본 장치는 고전압 발생회로를 포함한 고전압 발생부와 X-선관을 일체한 모노블럭 탱크부 X-선관의 필라멘트 및 로터를 제어하는 메인 제어부 그리고 고주파 고전압 인버터부로 크게 나눌 수 있고^[6] 본 논문에서는 이 장치를 설계 제작하여 이에 따른 관전압과 관전류 및 mAs량 등의 동작특성 파형을 실험을 통하여 나타내었다.

2. 회전형 애노드 모노 블록형 X-선 발생 시스템

X-선 장치의 구성에서 고전압 발생부는 고전압 변압기와 배전압 회로 그리고 X-선관의 Cathode측의 필라멘트를 가열하기 위한 필라멘트 전원 공급장치로 이루어지고 이 회로들은 고전압 절연을 위하여 오일 탱크에 함침 되어 지고 또한, X-선관의 양단에 고전압을 인가하고 Anode측 로터를 회전시키기 위한 고전압 절연 케이블이 반드시 필요로 하게 된다. 회전형 모노블록형 X-선 발생 시스템은 앞에서 언급한 바와 같이 크게 다음 세 부분으로 나눌 수 있다^[1,2,4,6].

- 1) 고주파 고전압 인버터부
- 2) 메인 제어부

3) 회전형 모노 블록형 X-선 탱크부

각 부분에 대한 구성과 동작특성을 살펴보면 다음과 같다.

2.1 고주파 고전압 인버터부

주 인버터 회로에는 100kHz의 고주파 스위칭으로 구동되는 풀-브리지 PWM 인버터를 사용하여 동작시켜 고전압 변압기의 소형화함으로써 이루어 모노 탱크의 부피와 크기를 축소 전체 제품의 크기와 무게를 대폭 저감하여 제품의 소형 경량화를 도모하였다^[6].

고주파 고전압 변압기의 설계 및 제작에 있어 트랜스포머 코어는 페라이트 (TDK UU100)을 사용하였고 설계 과정은 다음과 같다.

- 트랜스포머 투자율 B : 1500G
- 트랜스포머 단면적 Ae: 8.95cm
- 최소 DC 입력전압 Vin: 220V
- 스위칭 주파수 fs: 100kHz

총 6단의 2차측

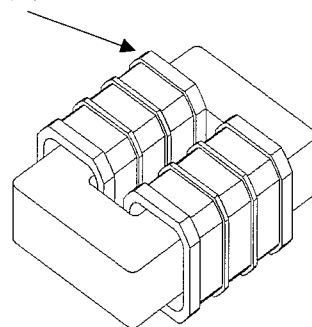


그림 2 고주파 고전압 변압기
FIG. 2 High frequency high voltage transformer

(1)고압 트랜스포머 1차측 턴 수

$$N_p = \frac{V_m \times 10^8}{4 \times B \times A_e \times f_s} \quad (1)$$

$$N_p = \frac{220 \times 10^8}{4 \times 1500 \times 8.95 \times 100 \times 10^3} = 4.09 \approx 4 \text{Turn}$$

(2)고압 트랜스포머 2차측 턴 수

- 최대 관전압 125KV
- 2차측 전압 단은 총 6단
- 2차측 각 전압 단은 2배압회로 사용(총 12배압)
- 2차측 각 단의 전압

$$V_s = \frac{125kV}{12} = 10.416kV \quad (2)$$

고압 트랜스포머 2차측 각 단의 턴수

$$N_s = \frac{V_s \times N_p}{V_{IN}} \quad (3)$$

$$N_s = \frac{10.416kV \times 4}{220V} = 189.3 \approx 189 \text{Turn}$$

그림 2에서는 본 연구에서 설계, 제작된 고주파 고전압 변압기의 외관을 보여준다. 2차측은 총 6단 구조로 구성하였다.

각 전압 단에서는 2배압의 배전압 회로를 사용했다. 각 단의 전압은 10.416kV이고 이 전압을 2배압 하면 각 단의 출력전압은 20.832kV이 된다. 총 6단의 전압 단을 2배압씩 하면 125kV의 출력전압이 된다. 그림 3은 제작된 고전압 변압기와 배전압 보드와의 연결 상태를 보여주고 그림 4는 실제 제작되어진 배전압 보드를 보여 주고 있다. 배전압 회로에 사용된 고압 캐패시터 및 고압 다이오드는 고압 캐패시터가 0.001uF/15KV이고 고압 다이오드는 8KV/140mA 사양을 적용하였다.

고주파 인버터부는 크게 메인 인버터부와 스위칭 소자인 IGBT Driver부 두 부분으로 구성되고 메인 인버터부를 포함한 회전 Anode형 모노블록 X-선 발생장치의 주요 사양은 다음과 같다.

- Generator 의 동작 주파수 : 100kHz
- 최대 파워(125kV, 200mA) : 16kW

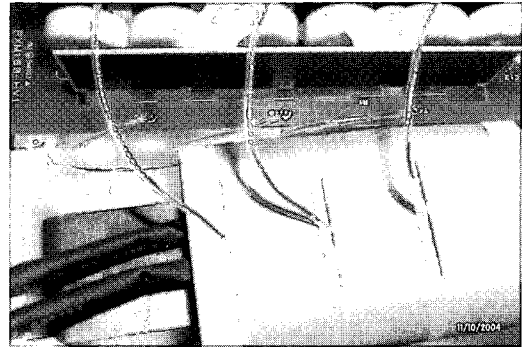


그림 3 고전압 트랜스포머와 배압 보드의 연결
Fig. 3 Connecting of high voltage transformer and multiplier board

- Anode Tube type : rotating(3000rpm)
- 최대 X-선 관전압 : 125kV
- 최대 X-선 관전류 : 200mA

스위칭 소자인 IGBT의 스너버회로는 RC스너버 회로를 사용하였고, 고전압 변압기 1차측과 IGBT단을 연결하는 5uF/700V의 결합 캐패시터를 사용하였다. 또한, IGBT 및 X-선관을 과전류로부터 보호하기 위한 전류검출 Core를 사용하여 보호회로를 구성하였다. 진단 X-선 장치의 사용 특성상 연속부하가 아닌 간헐 부하로 동작하므로 그림 5에서 보는바와 같이 IGBT 소자의 방열판의 소형화가 가능하였다⁶⁾.

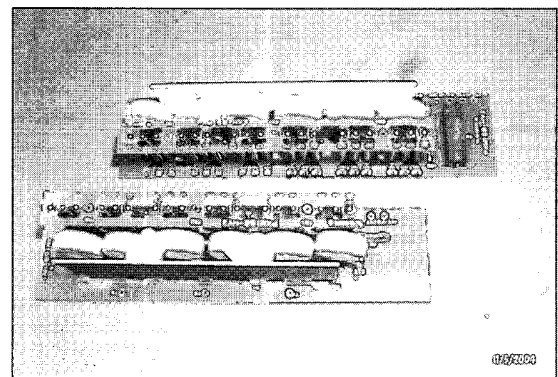


그림 4 고압 배전압 보드
Fig. 4 High voltage multiplier board

본 연구에서 사용한 X-선관의 필라멘트 사양으로는 필라멘트 전압이 2.5V-7.5V이고 필라멘트 전류가 3.4A-4.6A, 필라멘트 구동 주파수는 0-20KHz 범위의 것을 채택하였다.

이에 따른 X-선관의 필라멘트 전압 및 전류를 제어하기 위하여 DC-DC 컨버터로서 포워드 방식을 사용하여 DC출력 전압을 가변 하였고 필라멘트의 전압은 이 DC전압을 MOS-FET로 구성된 푸시-풀 방식의 인버터를 구성, 필라멘트 가열용 변압기 1차 측에 교류전압을 인가하여 필라멘트 필라멘트 2차측과 연결된 X-선관 Chathode측의 필라멘트를 가열시켰다. 그리고 가열된 필라멘트로부터 피드백 저항으로부터 전류를 피드백 받아 필라멘트를 전류를 제어 하였다.

그림 6은 실제 사용된 필라멘트 변압기를 보여준다. 본 연구에서는 회전형 Anode X-선관을 사용하기 때문에 대 초점-필라멘트 변압기와 소 초점-필라멘트 변압기를 모두 구성하였다.

본 연구에서 사용된 회전형 X-선관의 로터는 X-ray 조사시 로터를 구동시키기 위하여 포토 커플러를 통하여 AC전압의 제로 크로싱을 행하였고, 메인 컨트롤러로부터 로터 구동 신호를 받으면 2차측 포토 커플러를 통하여 트라액 소자를 이용 로터를 구동하였고, 이때 로터 선에 흐르는 전류를 CT를 통하여 검출하여 실제 로터가 구동하는지를 모니터 하였다.

- Input
 - Voltage : 100/200V(50Hz,60Hz)
 - Current : 2.9A(AC 100V,50Hz)
 - Power : 63W(AC 100V, 50Hz)
- Phase shift capacitor : 24uF
- Coil resistance
 - Main coil : 27.0 ohm
 - Auxiliary coil : 82.0 ohm
- Resistance between iron core and coil-----2 Mohm Min이고

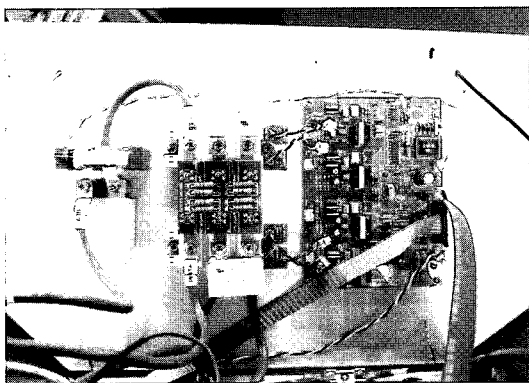


그림 5 고주파 인버터부 및 IGBT Driver
Fig. 5 High frequency inverter and IGBT Driver

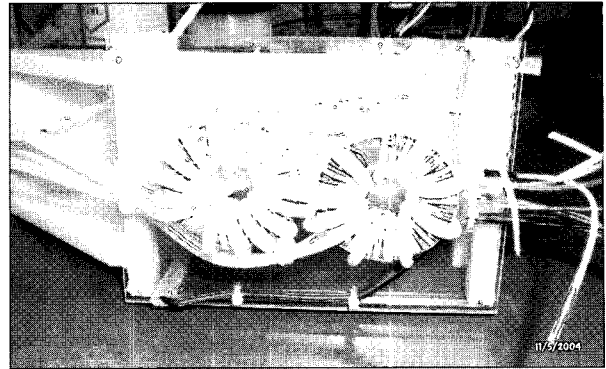


그림 6 필라멘트 가열용 변압기
Fig. 6 Filament Heating transformer

고전압 제어회로는 마이크로컨트롤러에 의하여 X-ray의 관전압 및 관전류가 제어 된다.

여기서 관전류 지령치는 관전류의 설정치에 따라 달라지는데 X-선관의 대 초점 과 소 초점을 사용할 때마다 다른 지령치를 내보내게 된다. 관전압 및 관전류 지령치는 고전압 회로로부터 피드백 되어 들어온 관전압 및 관전류와 함께 비교하여 이 신호를 PWM 컨트롤러에 인가된다.

이 인가된 신호 즉 지령치 및 피드백 신호의 차이만큼을 PWM제어를 통하여 설정된 관전압과 관전류를 추종하게 된다.

2.2 메인 제어부

그림 7에서 나타낸 바와 같이 메인 제어부는 CPU 제어회로와 로터 제어회로 그리고 kV, mA를 제어하는 PWM 회로로 나누어진다. 그림에서 나타낸 것과 같이 관전압은 CPU의 D/A 컨버터에 의해 지령전압 kV가 설정되고, X-선 조사 중 관전압은 고전압 발생 회로부의 마이너스 암에 구성되어진 CR 분압회로를 통해 관전압 제어기에 피드백 되어져 관전압 제어기의 출력 관전압 제어량에 따라 설정 관전압을 추종할 수 있도록 구성하였다. X-선관 내부의 로터를 구동하기 위하여 로터제어 회로를 사용하여 초기 X-선 조사 시 로터를 구동시킨다^[2,6].

또한, X-선관의 필라멘트를 가열하기 위하여 푸쉬풀 타입의 인버터를 사용, 회로의 단순구성을 도모하였고 정전류 제어를 함으로서 정밀한 mA제어를 구현하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 두 종류의 필라멘트 트랜스를 사용하여 대 초점과 소 초점의 동작모드로 필라멘트를 가열하였고, 예비가열(Pre-heat)구간에는 X-선관전류가 흐르지 않으므로 각 설정치에 따른 예비가열을 정전류 제어모드로 제어 하였다^[2,6].

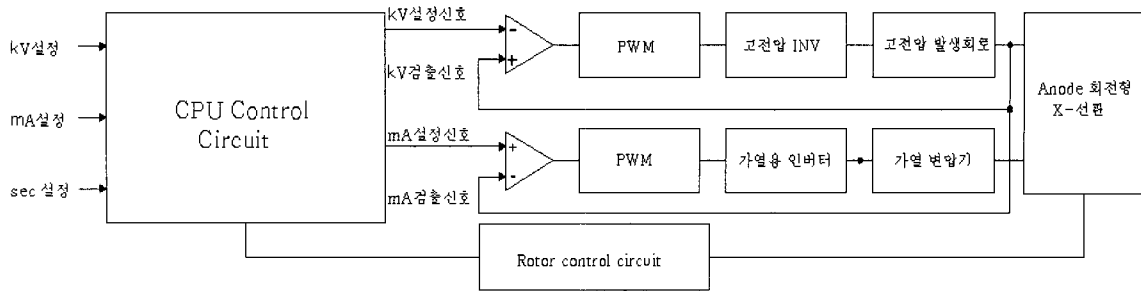


그림 7 제어 회로 블록도
Fig. 7 Control Circuit Block Diagram

2.3 Anode 회전형 모노 블록 X-선 탱크부

Anode 회전형 모노 블록형 X-선 발생 장치의 가장 큰 핵심은 모노탱크 부분이라고 할 수 있다. 이는 모노 탱크 부분을 고압으로부터 절연거리를 확보하면서 최소화, 경량화 하는 점이 제품의 성능 및 기능을 높여 줄 수 있기 때문이다. 모노 블록형 X-선 탱크는 고주파 고전압 트랜스, 배전압 회로, 관전압, 관전류 검출 회로, 필라멘트 가열용 변압기 그리고 Anode 회전형 X-선관으로 구성되어지고^[6] 그림 8은 본 연구에서 실제 제작된 16kW 모노 블록형 X-선 탱크의 내부 구조를 보여주고 있다.

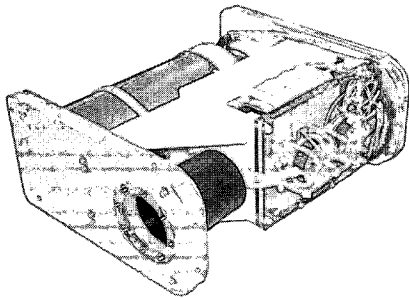


그림 8 실제 제작된 16KW 회전 Anode형 모노탱크
Fig. 8 16KW Rotating anode type mono tank

3. 실험결과

본 연구에서 제작된 모노블럭 장치의 관전압, 관전류의 설정치를 변동하였을 때의 실제 관전압 관전류 파형을 그림 9에서 그림 13에 나타내었다. 실험파형에서와 같이 X-선 관전압 kV와 X-선량에 영향을 주는 관전류 mA의 상승시간과 하강시간이 모두 양호하게 동작함을 보여주고 있다.

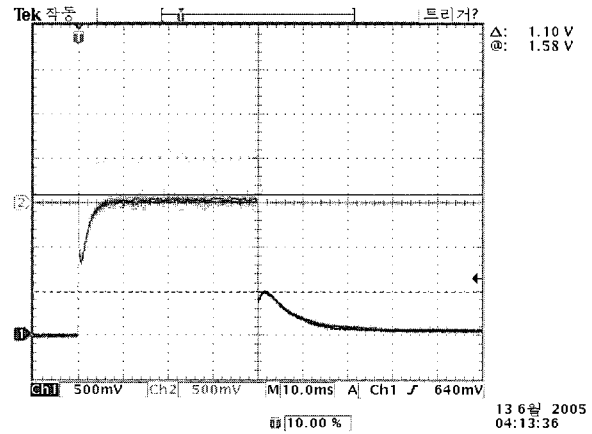


그림 9 X-선관전압(16.6kv/div, ch1), 관전류 (50mA/div, ch2), 40msec 파형
Fig. 9 X-ray tube voltage (16.6kv/div, ch1), tube current(50mA/div, ch2), 40msec waveform

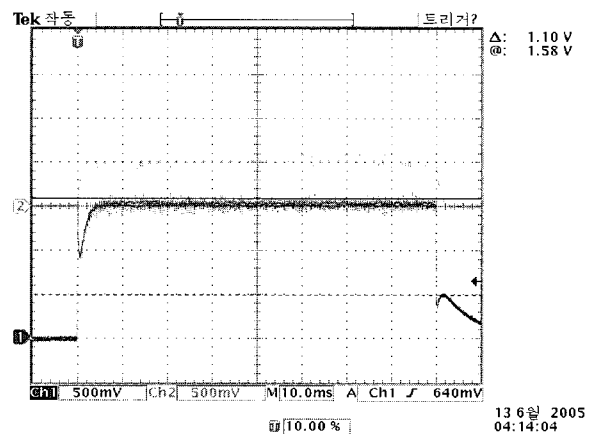


그림 10 X-선관전압(16.6kv/div, ch1), 관전류 (50mA/div, ch2), 80msec 파형
Fig. 10 X-ray tube voltage(16.6kv/div, ch1), tube current(50mA/div, ch2), 80msec waveform

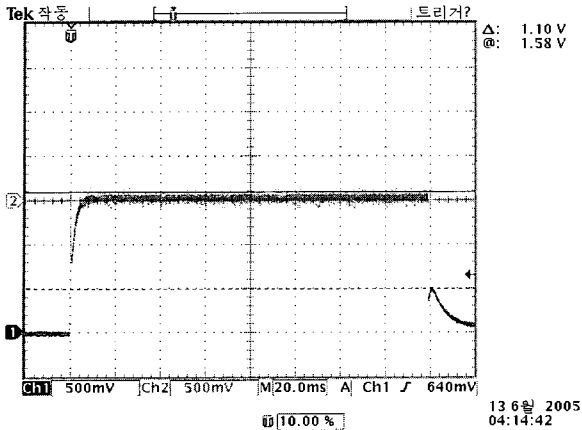


그림 11 X-선관전압(16.6kv/div, ch1), 관전류 (50mA/div, ch2), 160msec 파형

Fig. 11 X-ray tube voltage(16.6kv/div, ch1), tube current(50mA/div, ch2), 160msec waveform

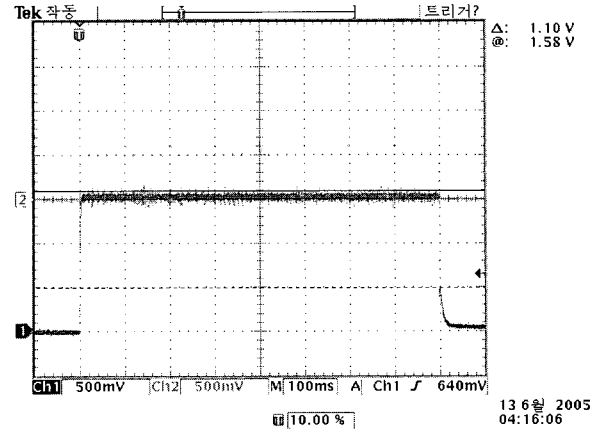


그림 13 X-선관전압(16.6kv/div, ch1), 관전류 (50mA/div, ch2), 800msec 파형

Fig. 13 X-ray tube voltage(16.6kv/div, ch1), tube current(50mA/div, ch2), 800msec waveform

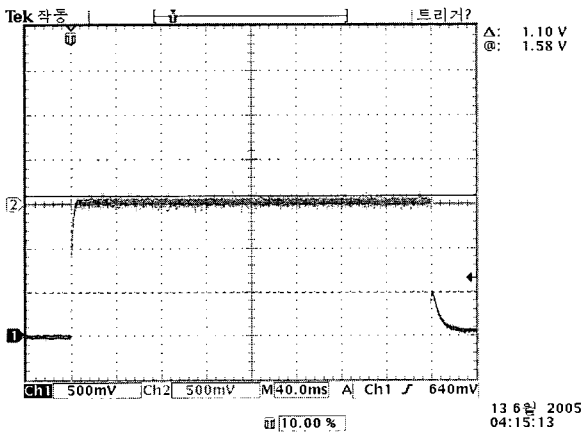


그림 12 X-선관전압(16.6kv/div, ch1), 관전류 (50mA/div, ch2), 320msec 파형

Fig. 12 X-ray tube voltage(16.6kv/div, ch1), tube current(50mA/div, ch2), 320msec waveform

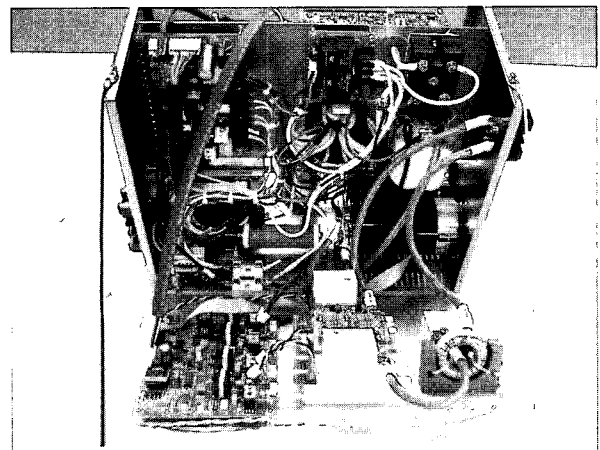


그림 14 고주파 고전압 인버터

Fig. 14 High frequency high voltage inverter system

여기서 하강시간은 고전압 회로의 커패시터 용량에 의해 결정되어진다고 볼 수 있으며 그림 14는 실제 제작되어진 고전압 인버터부를 보여준다.

4. 결 론

최근, 의료기관은 도시의 인테리전트 빌딩내에 개원 하는 일이 많아 좁은 공간에서도 사용할 수 있는 소형의 X-선 발생장치를 요구하고있을 뿐만 아니라 옥외에서도 손쉽게 사용할 수 있는 휴대용 X-선 발생장치를 강하게 요구하고 있다. 본 장비는 16kW 회전

Anode형 모노탱크 X-선 발생장치로써 장치의 소형화를 위한 모노블록형 X-선 탱크에 관하여 기술하였다.

또한, 제작된 제품의 X-선 관전류와 관전압 파형을 실험을 통하여 나타내었다. 향후 개선사항으로는 더욱 향상된 고주파 인버터 기술과 더욱 소형화 시킬 수 있는 모노블록형 X-선 탱크 제작이다. 또한, 모바일 형태의 대용량 모노 블록형 X-선 발생장치는 현재 전량 수입에만 의존하고 있는 형편이고 사용자의 요구에 대응하는 다양한 사양의 제품은 출시가 세계적으로 미미한 실정이므로 개발 시기와 상품화시기를 최대한 앞당길 경우 해외의 산업용이나 인체 의료용 X-선 시장에 경쟁력 있는 고부가 가치의 제품을 충분히 수출 할 수

있고 이러한 기술이 점차 축적된다면 이 분야의 세계 시장을 선도할 수 있으리라 예상하고 있다. 개발한 모노블럭형 X-선 발생장치의 활용 방안은 기존의 16kW급 X-선 시스템을 모두 대체 할 수 있는 제품 응용이 가능하리라 예상되고, 무엇보다 병원내의 이동이 용이한 모바일 형태의 X-선 시스템 적용이 효과적일 수 있으리라 생각되며 공간 활용이 제한적인 동물용 X-선 장비로의 적용이 상당히 용이하리라 판단된다.



김연충(金淵忠)

1995년 성균관대 공대 전기공학과 졸업.
1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
2001년 동 대학원 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박). 현재 (주)에코트론 연구소장.

참 고 문 헌

- [1] Izumi Ogura, and T. Aoyagi, "Analysis of the Basic Motion of the Resonance Type Inverter X-ray Generator by the Model circuit".
- [2] 김학성, 박영국 오준용, 성기봉, "진단 X-선용 40kW 고주파 고압 전원 시스템", 전력전자 학술대회 논문집, pp. 192~198, 2003. 4.
- [3] Kelly J.P and Trout E.D, "Physical Characteristics of the Radiation from 2-Pulse, 12-Pulse, and 1,000-Pulse X-Ray Equipment", Radiology100, pp. 653~661, 1971.
- [4] K.T. Compton: Magnetic Circuit and Transformers, John Wiley and sons, New-York, Chap. 18, 1943.
- [5] Rs. A. McCurrie: Ferromagnetic Materials, Academic, London, Chap. 2, 1994.
- [6] Hino, H., Hatakeyama, T. and NakaokaM, "Resonant PWM Inverter Linked DC-DC Converter using parasitic Impedances of High Voltage Transformer and Its Applications to X-Ray Generator", PESC Record pp. 1212~1219, 1998.

저 자 소 개



김학성(金學成)

1989년 성균관대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~현재 동양공업전문대 자동화시스템과 부교수.



오준용(吳俊龍)

1998년 서울산업대 공대 제어계측공학과 졸업. 2000년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2000년~현재 (주)에코트론 책임연구원.