

# 인버터식 X선발생장치용 고주파 공진형 고압변압기 등의 설계

광주보건대학 방사선과 · 광양보건대학 방사선과\*  
이성길 · 최성관\*

- Abstract -

## Design of High Frequency Resonant High-tension Transformer in Inverter Type X-Ray Generator

Seong Kil Lee · Sung Kwan Choi\*  
*Dept. of Radiologic Technology, Kwangju Health College*  
*Dept. of Radiologic Technology, Kwangyang Health College\**

Most of X-ray generator had used rectifier type transformer with high tension generator which is supplied in a clinical diagnosis. Because the ripple rate of tube voltage is high, X-ray generating efficiency is very low.

In these days, high tension generator for inverter type X-ray generator is being supplied from a broad which uses semi-conductor switching element for the electric power that have a high speed switching ability to solve these problem.

But, semi-conductor element with large capacity is used with X-ray tube's large consumption power and diffusion is difficult in the small size hospital because production cost is going up by doing digital control through DSP.

Therefore, this paper designed and manufactured CR type voltage divider for feedback control of tube voltage with high frequency resonance type inverter and for high tension transformer with high frequency. It was to make economical diffusion type X-ray generator which has wide output voltage and load extent. It was proved that the X-ray generator had the stability of X-ray tube's output characteristics.

### I. 서 론

현대의학에서 질병의 진단과 치료에 필수적인 방사선 검사에 이용되는 대부분의 X선발생장치는 상용교류 전원을 이용해 교류 고압을 발생시키고, 정류된 직류 고전압을 X선관에 인가하여 X선을 발생하는 정류형 변압기식 고압발생장치가 사용되고 있다. 그러나 이것은 원리적으로 고압변압기의 구조가 소형, 경량화가 어려운 점과 관전압의 맥동률이 커서 X선발생 효율이 매우 낮고, X선관 출력제어장치의 동작이 정밀치 못해 신뢰성이 문제점으로 지적되어 왔다.

종래의 진단용 X선발생장치의 문제점들을 개선하기 위해서 고속 스위칭 능력을 갖는 전력용 반도체스위칭 소자를 이용한 인버터를 X선 발생용 고압발생장치에 적용함으로써 고압변압기의 입력전압을 고주파화 할 수 있어 고압변압기 크기를 소형, 경량화할 수 있고, 관전압의 빠른 상승시간(rise time)으로 인해 1msec 정도의 짧은 시간 조사도 가능하다<sup>1, 2)</sup>.

이러한 인버터식 X선장치는 X선관의 소비 전력이 큼으로

대용량의 반도체 소자들을 사용하고, DSP를 통한 디지털 제어를 함으로써 정밀 제어가 가능하다<sup>3, 4)</sup>, 이러한 장치는 고가이며 대부분 수입에 의존하므로 소형병원에는 많이 보급이 어려운 실정이다.

따라서 본 논문에서는 정밀제어가 가능하고, 넓은 출력 전압과 부하범위를 갖으며 경제적인 보급형 X선발생장치에 적용할 고주파 공진형 인버터와 고주파용 고압변압기, 고정밀도의 관전압의 피드백제어를 위한 CR형 분압기를 컴퓨터 시뮬레이션 모의프로그램(Pspice)을 통해 설계하고, 그것을 근거로 고주파 공진형 고압변압기를 제작하여 X선 발생장치에 적용하여 특성분석 및 X선관의 출력특성의 안정성을 입증하였기에 그 결과를 보고한다..

### II. 이론 및 방법

#### 1. 고주파 공진형 인버터의 설계

고압변압기의 1차코일과 2차측코일 사이는 고압의 절

연을 위하여 절연 거리를 크게 설정하여 설계되어야 하는데 이것에 의해서 변압기의 누설인덕턴스가 증가하게 된다. 이 누설인덕턴스의 증가로 인하여 고압발생용 인버터의 주파수를 고주파화 할 경우 고압변압기의 임피던스가 크게 되어 변압기의 1차측에서 2차측으로 에너지 전달이 어려워짐으로 고압 발생장치에서 충분한 에너지 발생이 곤란하게 된다. 따라서 고압 발생장치를 대용량화 할 경우 공진용 커패시터를 추가하면 고압 변압기의 누설인덕턴스 성분과 함께 공진회로를 구성할 수 있어 고압 발생장치의 대출력화가 용이해진다.

변압기의 유도기전력 E는 식 (1)과 같이 나타낸다<sup>5)</sup>.

$$E = K \cdot f \cdot B \cdot A \cdot n [V] \dots\dots\dots (1)$$

(K : 비례정수, f : 주파수, B : 자속밀도, A : 철심단면적, n : 권선수)

여기서 주파수를 높임으로써 철심 단면적과 권선의 감는 수를 줄일 수 있어 고압 변압기는 대폭 소형화할 수 있다. 이때 주파수를 고주파화 하기 위해서 인버터를 사용한다.

그림 1은 고주파 공진형 인버터를 도입한 X선발생장치의 전력변환시스템을 나타낸다. 인버터에 공급되는 직류 전원은 저전압 정류장치를 이용하였고, 직류 입력전압을 높은 주파수의 교류 출력전압으로 만들기 위해 고속 스위칭소자인 IGBT를 사용하여 공진형 PWM 인버터를 구성하였다. 인버터 출력을 고전압으로 승압시키기 위한 고압변압기와 고압케이블이 연결되고 부하로 작용하는 X-선관에 직류 고전압을 가하기 위한 다이오드 정류회로, 그리고 X-선관의 필라멘트 전류를 제어하는 고주파인버터로 구성되어있다<sup>6)</sup>.

본 논문의 X선 발생장치에서 공진형 인버터의 공진 파라미터의 설계는 인버터의 출력전류가 스위칭 소자의 정격인 400A를 넘지 않도록 하기 위해 공진인덕턴스의 값

을 10  $\mu$ H, 공진 콘덴서는 20  $\mu$ F으로 하였고 이때 고압변압기의 1차권선의 저항은 0.7  $\Omega$ 으로 하여 설계하였다.

공진주파수를 계산하면 약 11 kHz이고 공진전류는 356A이다. 인버터의 스위칭 주파수인 20 kHz보다 공진주파수를 낮게 한 이유는 인버터의 구형파 전압의 고조파를 더 고차로 함으로써 고조파를 제어하여 필터의 효율을 증가시키고, 스위칭 소자의 파괴를 막기 위해 인버터의 출력전류를 IGBT의 정격전류인 400A를 넘지 않게 하기 위함이다.

그림 2는 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램(Pspice)을 이용하여 공진인덕턴스를 각각 3  $\mu$ H와 10  $\mu$ H로 변화시켰을 때 공진주파수와 공진전류의 관계를 나타내며 3  $\mu$ H일 때 공진주파수는 20 kHz이고 공진전류는 442A이며, 10  $\mu$ H일 때는 공진주파수가 11 kHz이고 공진전류는 356A이다.

## 2. 고압변압기의 설계

본 논문에서 제작한 고압변압기는 고주파용으로 설계됨으로 철심재료에는 고주파의 외부자계를 가할 때, 자성체에 유도되는 외부자계가 매우 작아서 인덕터 및 변압기의 철심으로 사용되는 페라이트를<sup>7,8)</sup> 사용하여 와전류를 줄임으로 음손실을 줄일 수 있었다. 그림 3은 고압변압기의 구조를 나타낸 것이다. 1차 권선과 2차 권선 철심에 2각으로 나누어 감겨져 있고, 한 쪽은 anode측, 다른 한쪽은 cathode측에 접속되어 있다. 1차 권선은 병렬로 접속함에 따라서 전류용량을 확보함과 동시에 누설인덕턴스를 저감시킬 수 있다. 2차 권선은 부유용량을 낮추기 위해 2개로 분할되어 있다. 그림 4는 변압기에 사용된 코어의 외형과 치수를 나타내낸다.

1차권선은 1층 구조로 하고 턴수는 12회이고, 2차권선은 권선수가 많기 때문에 다층구조로 되어 있고, 층 사이에 감은 절연지 장수를 바꾸어 내전압의 정전용량을 최적화 하였다. 2차권선은 1각마다 2분할하여 각각 직렬로 접속함으로써 권선의 부유용량을 저감하였다.

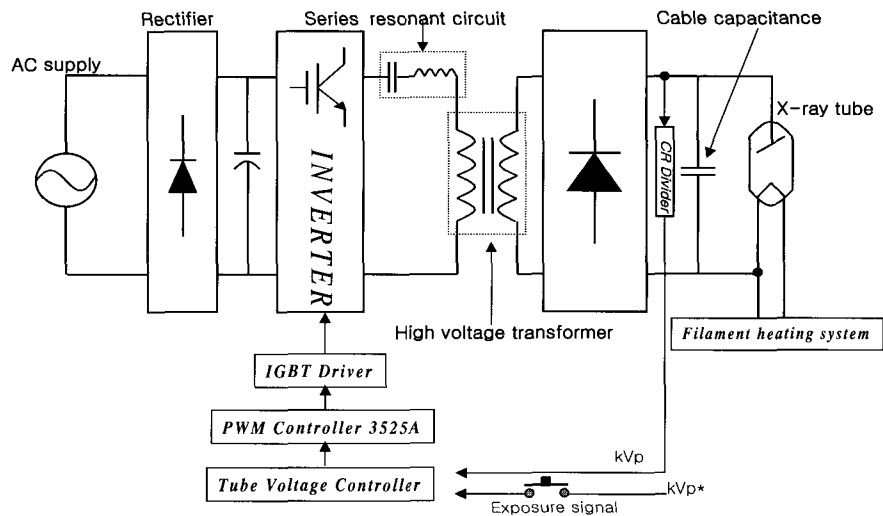


Fig. 1. Serial resonant load circuit

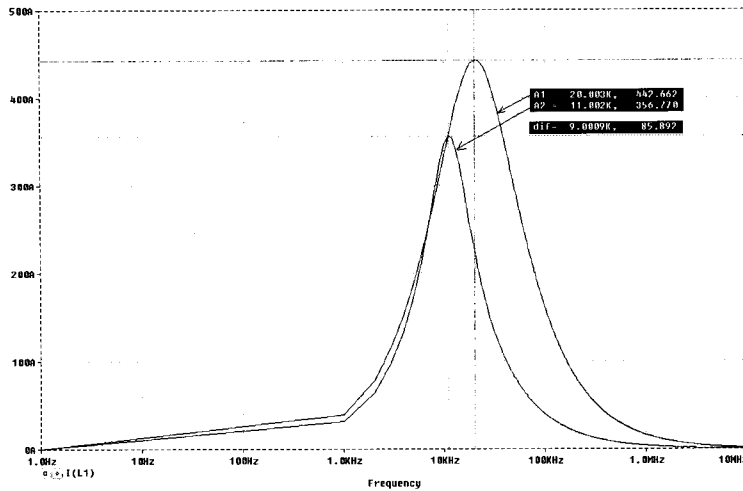


Fig. 2. Graph of resonant frequency

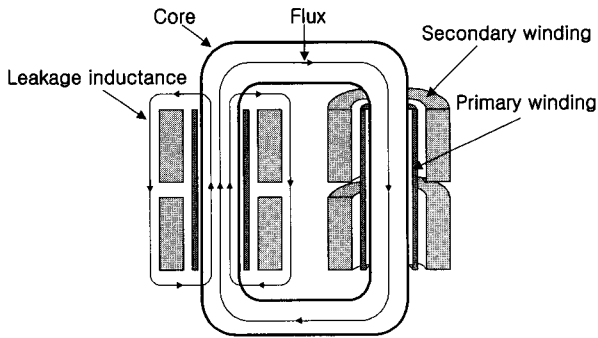


Fig. 3. High-voltage transformer

통상 75 kV 이상의 내압을 견디기 위해 1차와 2차의 권선간에는 일정한 거리를 띄어야 되는데 이것에 따라 누설자속이 생겨 누설인덕턴스가 작용한다. 고전압 변압기의 누설인덕턴스가 크다면 인버터의 동작주파수의 고주파와 함께 출력의 임피던스를 증대시키게 되고 X선 고전압장치의 대출력화에 바람직하지 않다. 그래서 고전압 변압기 입력측에 직렬콘덴서를 삽입하여 직렬공진회로를 구성하고 이 누설인덕턴스에서 전류공진을 일으켜서 고전압 변압기로부터 부하에 충분한 전류를 공급하였다.

변압기 1차측 권선수 선정은 식(2)에 의해서 1차측 권

선수  $n_p$ 를 선정하였다.

$$n_p = \frac{(V_p - 0.05 V_p)}{4.44 f B_{sat} A_c} \times 10^8 \dots\dots\dots (2)$$

(  $B_{sat}$  : 포화 자속밀도(gauss),  
 $A_c$  : 철심의 유효 단면적( $cm^2$ ) )

또한, 고압변압기의 2차측 권선수  $n_s$ 는 식 (3)과 같이 선정하였다.

$$n_s = \frac{n_p (V_s)}{V_p} \dots\dots\dots (3)$$

변압기 1차 권선은 직접 코어위에 감았으며 2차 권선은 수지제품의 보빈 위로 감았다. 2차측권선을 25층으로 하여 각 층마다 30턴씩 감았고 층간 내압은 15 kV 정도이다. 다층으로 나누어 감았기 때문에 권선간의 부유용량이 증가하여 고압 발생 시 스파크가 생기는 현상을 에폭시 몰딩기법을 이용해서 제거할 수 있었다. 그림 5는 고주파 고압변압기와 필라멘트 가열 변압기의 실물이다. 표 1은 고압변압기의 설계사양을 나타낸다.

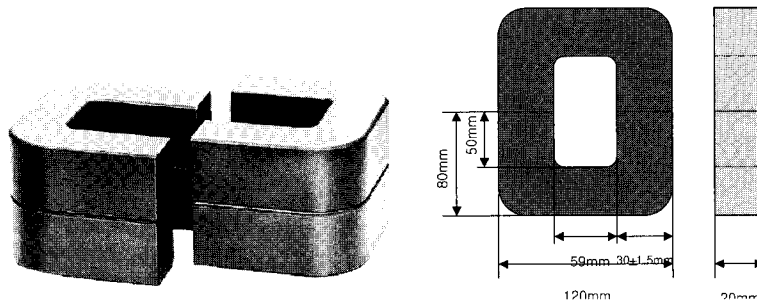


Fig. 4. Core shapes and dimensions

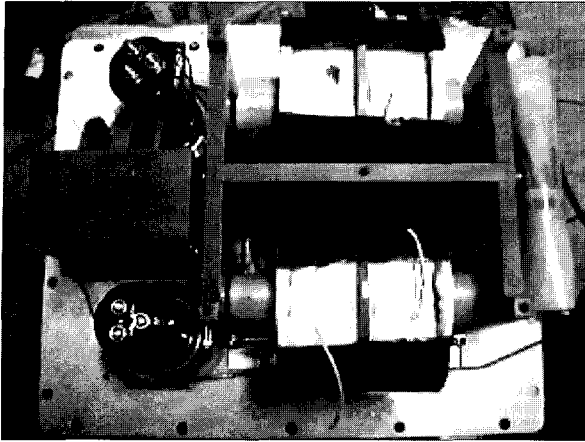


Fig. 5. HFHV transformer and filament heating transformer

### 3. CR 분압기의 설계

X선 발생용 고주파 고압 발생장치에서 X선 조사시간 동안 X선관에 걸린 직류 고압을 분압된 형태의 전압으로 정확히 측정하는 것은 X선 장비의 특성 분석 및 고정도의 관전압 제어에 있어 필수적인 요소가 된다.

고압을 측정하는데는 저항만으로 구성된 저항 분압기는 제작이 용이하므로 많이 사용되지만 이러한 형태의 분압기는 접지에 대한 분압기의 분포 표유용량에 기인한 주파수 특성이 낮기 때문에 분압기의 출력전압은 분압비에 비례하지 않는다. 때문에 이러한 대지에 대한 표유용량성분의 영향을 보상해 줄 수 있는 분압기가 고려되어야 하는데 그 대표적인 형태의 분압기가 병렬 CR형 분압기라고 할 수 있다<sup>9)</sup>.

본 논문에서 설계, 제작된 병렬 CR형 분압기는 고압용 저항(200 MΩ) 2개를 병렬로 1조씩 연결 5조를 직렬로 연결하고 끝단에 출력저항 33 kΩ을 연결하고 이에 대해 각각의 저항에 커패시터를 연결하였다. 제작된 분압기의 분압비는 약 15,000 : 1로 하였다. 또한, 제작된 분압기는 고압변압기 및 고압 다이오드로 구성된 고압 정류부와 합

Table 1. Specification of transformer

Structure	core type, pyramid double winding type (1st : parallel, 2nd : serise) layer insulation : acryl spacer, insulation oil, insulation paper
Core wood & size	TDK PE 22, 110×160×20mm
1st turn number & standard winding	12turns Cu sheet (2×6mm)
2nd turn number & standard winding	3000turns(φ:0.23mm) : enamel wire

께 절연유에 유침시켰다. X선용 고압 발생장치에서는 관의 양극측 또한 음극측의 고압 측정이 필요하므로 분압기가 두 개 필요하였다. 저항의 내 전력을 줄이기 위하여 저항 2개를 병렬로 사용하였고 콘덴서의 내압을 줄이기 위하여 직렬로 콘덴서를 연결하여 회로를 구성하였다. 분압기의 전달함수식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}}{\frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}} \dots\dots\dots (4)$$

식 (4)에서  $R_1 C_1 = R_2 C_2$ 가 되도록 각각의 저항값과 커패시터 값을 정하면 주파수에 독립적인 식 (5)와 같이 된다.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \dots\dots\dots (5)$$

이와 같은 방법으로 검출하는 출력전압은 다양한 주파수의 리플도 제어가 가능할 뿐만 아니라 전원장치의 과도응답 특성을 향상시킬 수 있었다. 그림 6은 분압기의 회로를 나타낸다.

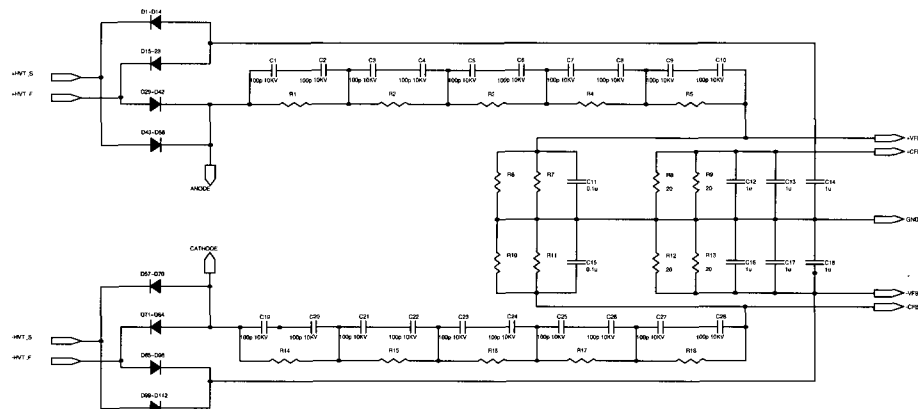


Fig. 6. Parallel CR type voltage divider

### III. 실험 결과 및 고찰

본 연구에서 설계한 X선 발생장치의 구성은 그림 7에서와 같이 저압부인 고압변압기 전단에 구성되어지는 정류부와 평활콘덴서, 직렬공진형 인버터로 구성되어 지고, 고압부인 인버터의 선간 전압을 승압하여 고압을 얻기 위한 고주파 고압변압기와 고압을 정류하여 X선관 양단에 직류 고압을 공급하기 위한 고압 정류부, 그리고 X선관 입력 전압 공급선(feeder)으로서 출력측의 평활 필터로 사용되는 고압 케이블이 있고, X선관 음극의 필라멘트를 가열하기 위한 필라멘트 가열회로로 인버터와 필라멘트가열용 변압기로 이루어진다. 단상 220V 전원을 600V, 50A 용량의 브릿지 다이오드를 병렬로 연결하여 다이오드 순방향 전류를 분배할 수 있어 시스템의 단가를 낮추고 직류링크단의 전압 불평형을 해결할 수 있었다. 정류기를 거쳐 맥동한 직류전압을 김<sup>9)</sup> 등은 DC-DC converter를 사용해서 DSP를 통해 디지털 제어를 하면 고조파를 제거하여 역율이 개선되므로 안정된 직류전압을 공급할 수 있으나 원가 상승요인이 있고 회로 구성이 복잡해 본 논문에서는 4700  $\mu$ F, 315WV의 용량인 평활용 콘덴서 6개를 병렬로 사용하여 리플이 없는 안정된 직류전압을 만들어 인버터의 양단에 인가하였다. 그리고 시스템이 오프 되었을 때 콘덴서에 충전된 전하를 강제 방전을 위해

방전용 저항을 사용하였고 이 저항과 직렬로 전력용 스위치를 추가하여 방전 시정수에 맞는 방전시간을 조절하여 보다 안전한 시스템을 구현할 수 있었다. 그림 8은 실험장치의 모습을 나타낸다. 표 2는 고주파 공진형 인버터의 사양을 나타낸다.

그림 9의 채널1은 인버터의 출력전류 파형으로 공진파형을 나타내며, 채널2와 채널3의 신호는 180° 반전되어 IGBT에 각각 인가되는 게이트 신호이며 듀티비에 따라 인버터의 출력을 제어할 수 있다.

그림 10은 관전압이 100 kV, 관전류 100 mA일 때 인버터의 DC링크 전압(채널1)과 IGBT의 양단에 걸리는 Vce(채널2)와 이때 흐르는 인버터의 출력전류(채널3)를 나타낸다. 그림 11은 관전압, 관전류를 피드백 제어하기 위한 CR 분압기에서 검출된 관전압과 중성점전류의 검출을 통한 관전류를 나타낸다. 채널1은 고압변압기 1차측 전류이고 채널2는 관전압, 채널3은 관전류를 나타낸 것으로 맥동율이 안정화되어 나타난다.

그림 12는 고압변압기 1차측의 전압 및 전류파형을 나타내고 이때 측정된 전압은 공진콘덴서와 공진인덕터의 후단인 고압변압기 1차측의 전압, 전류파형으로 공진회로의 전압강하로 인해 인버터의 출력전압보다는 낮게 나타난다.

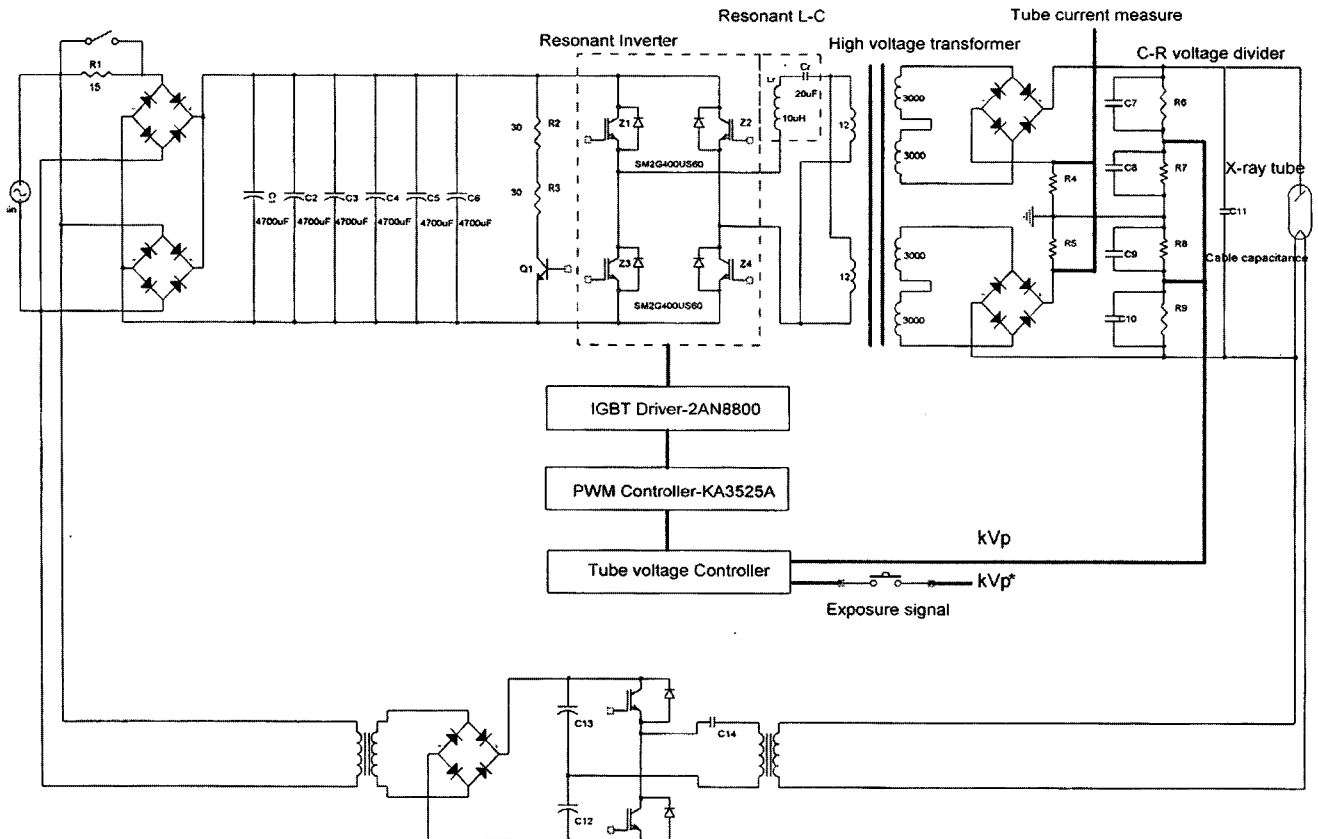


Fig. 7. Whole configuration of Inverter type X-ray generator

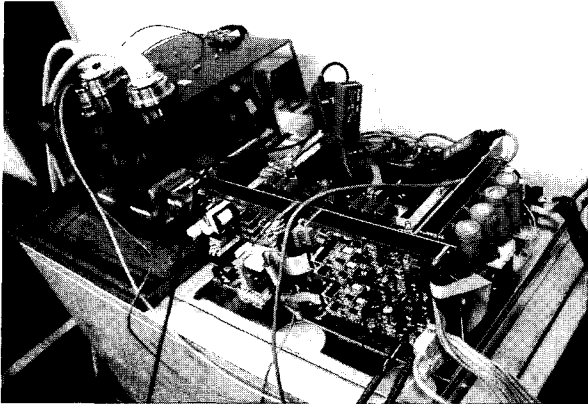


Fig. 8. Experimental equipment

Table 2. Parameters of inverter

Parameters	Value
Line voltage	AC 220[V]
DC link voltage	310[V]
Switching frequency	20[kHz]
Smoothing condenser	4700 $\mu$ F, 315[WV] $\times$ 6
Resonant condenser	20[ $\mu$ F]
Bridge diode	600[V], 50[A] $\times$ 2
IGBT	400[A], 600[V]
Resonant inductance	10[ $\mu$ H]

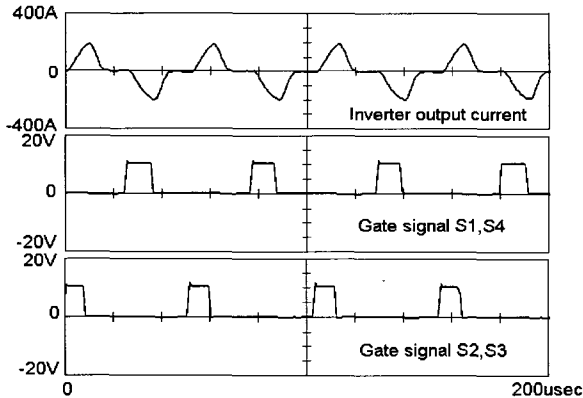


Fig. 9. Output current and gate signal of inverter

그림 13의 (a), (b)는 CR분압기의 양극과 음극간의 관전압(60 kV, 80 kV, 100 kV, 120 kV) 파형을 나타내며 관전압이 높아짐에 따라 맥동률이 점점 증가하였다. 그림 14는 고주파 공진형 인버터식 X선 장치를 이용해 관전류 50 mA, 조사시간 200 ms에서 관전압을 60 kV, 80 kV, 100 kV, 120 kV로 변화시켰을 때의 관전압 파형으로 맥동률(60 kV : 6.2%, 80 kV : 6.8%, 100 kV : 7.8%, 120 kV : 8.8%)의 변화폭이 3상6피이크정류회로(13.4%)와 3상12피이크

정류회로(3.4%)<sup>10)</sup>의 중간정도로 매우 작고, 안정하게 나타났다. 이것은 고압변압기의 입력전압을 고주파화(20 kHz)했고, 고압케이블의 정전용량(250~300 pF/m)<sup>3)</sup>이 추가되었기 때문으로 사료된다.

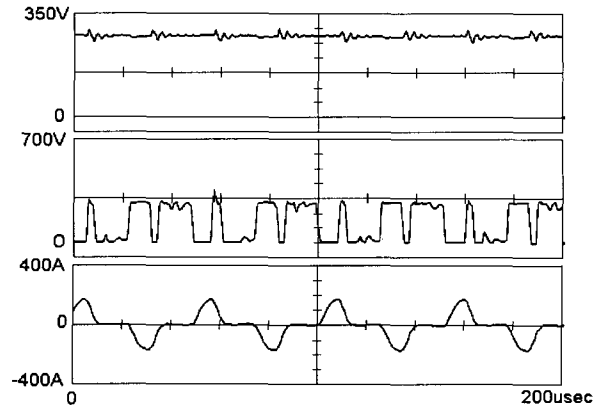


Fig. 10. IGBT E-C Voltage and current waveforms of inverter

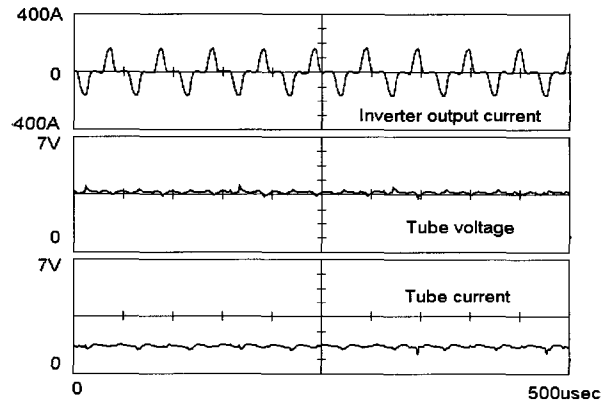


Fig. 11. Voltage of CR divider and Measuring tube current

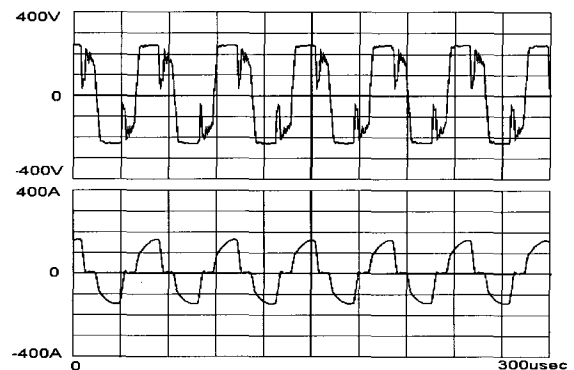
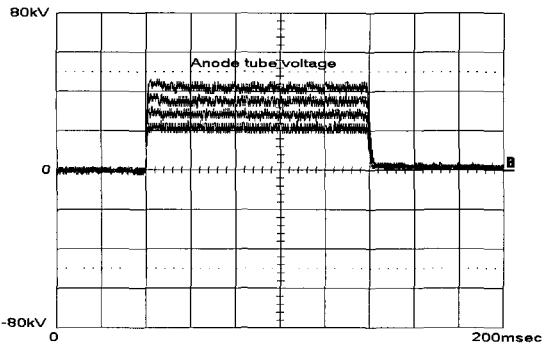
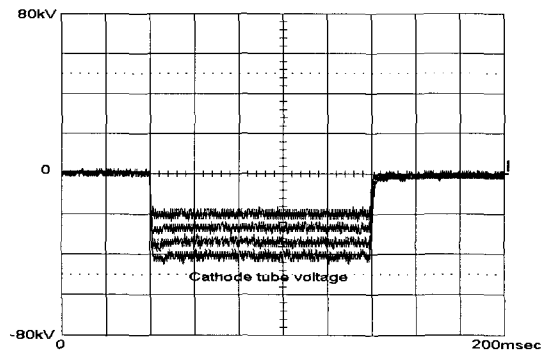


Fig. 12. Primary windings current and voltage waveforms of H.T



(a) Anode tube voltage



(b) Cathode tube voltage

Fig. 13. Tube voltage waveforms of CR divider

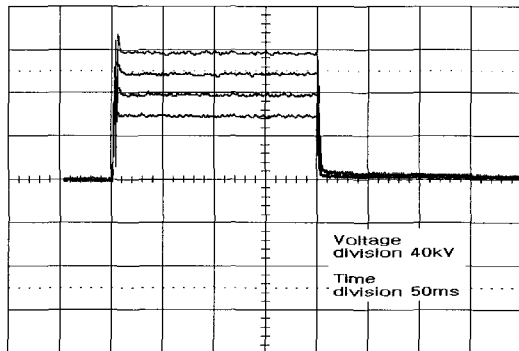


Fig. 14. Output voltage waveforms of X-tube

#### IV. 결 론

인버터식 X선 발생장치용 고주파 공진형 고압변압기를 설계, 제작하여 출력전압, 전류파형 등 출력특성을 실험하였다.

공진회로로 인버터를 구성하고 고주파로 동작시킴으로써 고압변압기를 포함한 전체시스템의 소형·경량화를 도모하였고, X선 장치의 특성 분석 및 고정도의 관전압의 피드백제어를 위해 고주파 고압변압기의 2차측의 관전압, 관전류 검출용 CR분압기를 설계하여 적용한 결과 실제 출력특성과 거의 일치된 신호를 얻을 수 있어 인버터식 X선 발생 장치의 정확한 제어를 가능케 하였으며, 관전

압의 맥동율도 낮아 출력의 안정성이 높고 밀도 고 전력, 저 노이즈와 빠른 과도 응답특성을 갖는 X선 발생 장치를 제작할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. T.F. Wu, J.C. Hung : A PDM Controlled Series Resonant Multi-level Converter Applied X-ray Generators, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, pp. 1177-1182, 1999
2. H. S. Kim, C. Y. Won, D. W. Yoo, S. W. Ha : A Study on High Power Resonant Converter for X-ray Generator, Proceedings of ICPE'95, pp. 288-294, 1995.
3. 高橋透影 : インバータ式 X-線高電壓装置 の 特性と臨床效果, 日本放射線技術學會雜誌, Vol. 46(12), pp. 1901~1908, 1990.
4. Y. J. Kim, T. Hatakeyama, M. Nakaoka : Comparative Evaluations of Phase-Shifted PWM Resonant Inverter-fed DC-DC Converter with High-Voltage High-Frequency Transformer Link, Proceedings of PEDS'95, pp. 657-664, 1995.
5. Y. J. Kim, M. Nakaoka, H. Takano, T. Hatakeyama : Comparative Performance Evaluations of High-Voltage Transformer Parameter Resonant Inverter-Linked High-Power DC-DC Converter with Phase-Shifted PWM Scheme, Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, pp. 120-127, 1995.
6. M. Nakaoka, S. Nagai, Y. J. Kim, Y. Ogino, Y. Murakami : The State of the art Phase-shifted ZVS-PWM Series & Parallel Resonant DC-DC Power Converter Using Internal Parasitic Circuit Components and New Digital Control, Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, pp. 62-70, 1992.
7. Jun Takahashi, Hiroshi Takano, Mutsuo Nakaoka : A State-of-the-art 50kW-10 kHz Soft-Switching Assisted PWM DC-DC Converter for X-ray Power Generator, Proceedings of PCC'93, Yo-kohama, Japan, pp. 165-170, 1993.
8. H. Hino, T. Hatakeyama, K. Kawase, M. Nakaoka : High frequency parallel resonant converter for X-ray generator utilizing parasitic circuit constant of high voltage transformer and cables, INTELEC 189, 11th Int. Telecommunications Energy Conference, Conference Proceeding, Vol. 2, pp. 20, 5/1-8, 1990
9. 김학성, 김현준, 유동욱, 하성운, 원충연 : X-ray용 고주파 공진형 고전압발생장치에 관한 연구, 대한전자공학회, 하계 종합 학술대회 논문집, Vol. 18, pp. 400-404, No. 1, 1995.
10. 김영일 외 : 진료영상기기학, 신광출판사, pp. 207-225, 1998.