

치료용 입자가속기를 위한 고속 스캐닝 전자석 전원공급장치 개발 (Development of fast scanning magnet power supply for particle accelerator therapy)

김동수, 김영우, 유효열

Department of Research and Development, Dawonsys
227, Gyeonggigwagidae-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do, Korea
Email: dskim@dawonsys.com,

Abstract

본 논문은 고속 Scanning 전자석 전원공급 장치를 제작하여 한국 원자력 의학원에 납품하였고, 전원 장치 성능을 확인하였다. 한국 원자력 의학원에서 요구 사양은 전류 기울기가 440 kA/s와 출력 전압 / 전류는 $\pm 530 \text{ V} / \pm 80 \text{ A}$ 이며, 과도상태 이후의 전류 정밀도는 $\pm 100 \text{ ppm}$ 이하를 만족하는 전원장치 이다. 전류가 고속으로 증가하기 때문에 출력 케이블과 전자석 자체의 표피효과로 인해 구간별 성능에 미진한 부분이 확인되어 추가 연구개발이 요구된다.

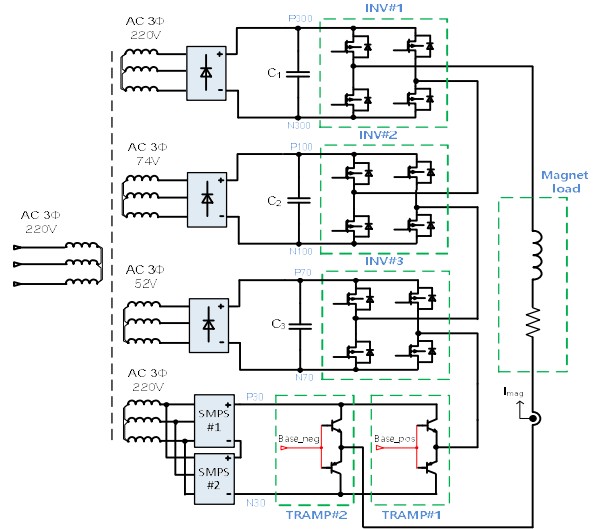
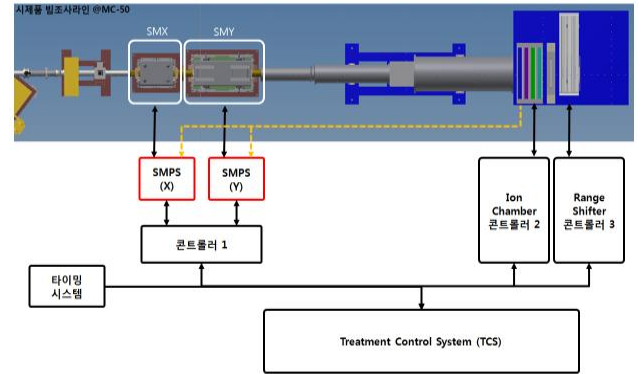
Keywords: Scanning MPS, Ramping Rate, Particle Accelerator, Dipole Magnet, Skin Effect.

1. Introduction

치료용 중입자 가속기는 탄소입자를 가속하여 암을 치료하는 최첨단 초정밀 치료기기로서 기존 방사선 치료에 비해 정상조직 손상이 거의 없으며, 암의 형태와 크기에 맞는 선택적인 집중조사가 가능하다[1]. 가속기의 빔 추출라인 종단에 위치한 다이폴 전자석은 X, Y 평면상의 빔의 위치를 정확하게 이동시키기 위한 쌍극의 전자석이다. 치료용으로 다이폴 전자석을 이용하기 위해서는 치료부위에 빔 전달을 극대화시키고 다른 정상조직 부위에는 빔 전달을 극소화시키는 것이 필요하다. 즉 빔의 출력전류는 목표 종양 조직 영역에 정확하게 전달되어야 한다[2-5]. 제작된 전원장치는 현재 한국 원자력 의학원에 설치되어있고 50 MeV 양성자 가속기인 MC-50 사이클로트론의 시제품 빔 조사라인에서 사용될 예정으로, X 축의 펄스형 고속 이동을 목표로 하고 있다.

2. Power Supply Characteristics

스캐닝 전원장치의 구성도와 주요 전기적 사양에 대해서 그림1에서 보여주고 있다. 전원장치는 부스트용과 리니어 전원용의 2개 주요 모듈로 구성되어 있다. 인버터 모듈은 전압별로 3개로 구성되며, 리니어 전원용은 기본적으로 정밀 제어 구간을 제어할 수 있도록 전력용 트랜지스터를 이용하여 신호를 제어하였다. 전류 증가속도(440 kA/sec)를 만족하기 위해 각각 70 V, 400 V (300 V + 100 V)의 부스트용 DC 전원이 사용되며, 전류증가 구간에서는 인가된 전압에 의해 $L \frac{di}{dt}$ 의 속도로 전류가 상승하게 되고 고속 상승과 고속 하강을 위해서 양방향 전원을 인가하기 위해 IGBT H-bridge 인버터 회로로 구성하였다. 부하 전류가 정상상태 레벨에 거의 도달할 때 부스트 구간이 끝나는 시점에서 인버터는 전류를 바이패스 시키고 최종적으로 트랜지스터만 동작하여 정상상태 전류를 정밀 제어한다.



	특성	설명
부하	1 mH / 6.2 mΩ	부하 인덕턴스 / 저항
상승율	440 kA/s	전류 기울기
스텝	1.2 A / 2.727 us	전류 스텝
	80 A / 190.47 us	
정밀도	$\pm 100 \text{ ppm} (\pm 8 \text{ mA})$	과도상태 이후
	300 ppm (24 mA)	8시간 안정도
정상상태시간	50 us ~ 100 ms	정상상태시간

그림 1. Scanning MPS 구성도 및 전기적 사양

3. Control

빠른 출력 응답을 얻기 위해 300 V, 100 V, 70 V 의 부스트 인버터를 사용하여 상승 시키며, 16 bit, MSPS ADC와 FPGA를 이용해 인버터 고속 제어를 수행하였다. 이를

위해 FPGA 에서는 전류오차를 비교해 필요한 인버터 전압을 계산하고, 그에 따른 인버터 출력제어를 함으로써 오버 샷이 발생하지 않을 수 있었으며, 총 부스트 시간은 출력전류의 크기에 따라서 제한된다. 아날로그 증폭기의 전류 명령 값과 피드백은 각각 16 bit DAC 와 18 bit, 680 kSPS ADC 를 사용하였다. 아날로그 증폭기는 80 MHz 의 Gain-Bandwidth를 가지며, 입력된 명령값과 피드백을 비교하여 출력하고, 이는 파워 증폭기 및 리니어 파워 트랜지스터에 전달되어 최종적으로 30ppm 의 안정도를 가지는 출력이 전자석에 출력된다. 아날로그 증폭기의 이득은 약 500 이며, 이는 안정상태에서의 전류 리플을 고려하여 선정되었다. 고속출력 및 제어를 하기 위해서는 정밀 DCCT 선정과 Bandwidth가 300kHz 이상의 제품을 선정하는 것이 성능구현에 유리하며 전류 값을 빠르게 읽어드려 명령 값과 비교가 가능해진다. 사용된 DCCT는 HITECH사의 MACC150이며 300kHz Bandwidth를 가진 제품을 적용하였으며, 외부 노이즈나 온도 변화 영향이 적어 정밀 전류 제어용으로 Scanning MPS에 적합하다.

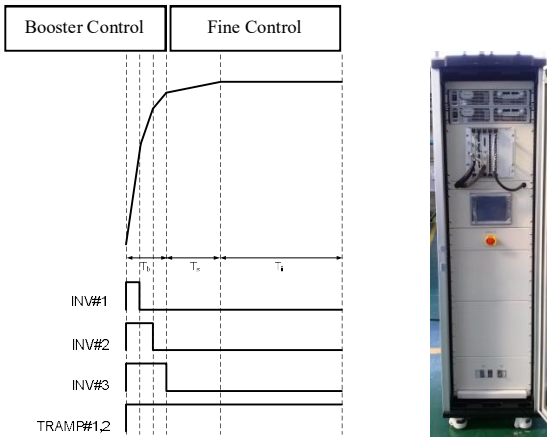
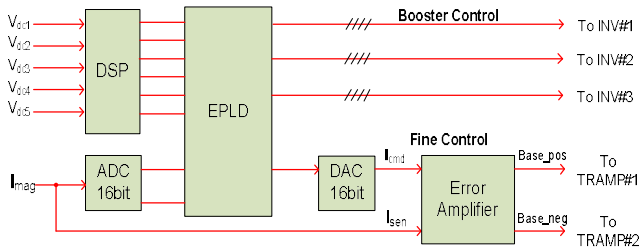


그림 2. Scanning MPS 제어와 출력방법 및 장비

4. Experimental Results

한국 원자력 의학원에서 주로 사용하는 전류 스텝은 1.2A, 5A, 10A이다. 5A인 경우 2 개의 부스트가 동작하며, 순차적으로 오픈된다. 초기 전류 기울기는 440 kA/s이상으로 동작하며 0A에서 5A까지 도달 시 스텝시간은 11.3625us 이내이다. 스텝시간 + 정상상태 도달시간 (11.3625 us + 50 us = 61.3625 us)에 100ppm 이내가 되는 것을 확인하였다.

정상 세포조직 조사를 최소화하기 위해 빠른 시간 내에 전류를 변화시킨다. 그림. 3은 최소 조사시간인 50 us의 전류를 유지하는 연속파형이다. 5A 스텝으로 변화되며 최소시간 (61.3625 us + 50 us = 111.3625 us)마다 전류가 변화된다. 전류가 변화되는 구간은 정격전류인 ± 80 A이다.

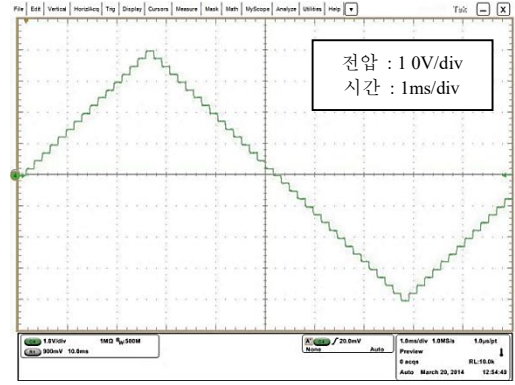


그림 3. 5A 전류 연속파형(정격전류 80A)

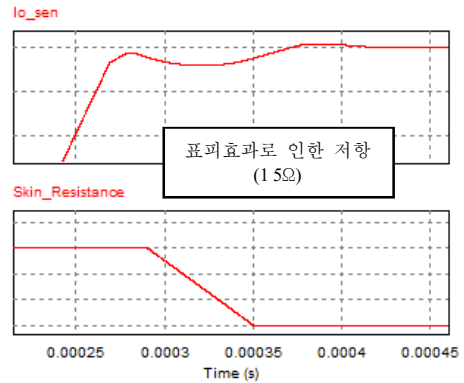


그림 4. 표피효과 시뮬레이션

5. Conclusion

본 논문은 Scanning MPS의 성능을 확인하였고, 전류 변화폭이 큰 경우, 즉 440 kA/s의 전류 기울기 영향으로 전류 증가 구간에서 표피효과에 의한 저항 성분이 발생하는 것을 확인하였다. 부스트 구간에서 표피효과로 인해 발생한 저항성분이 일정 시간 유지 되기 때문에 전류 감소현상이 관찰되었다. 향후 대책으로 표피효과를 줄이기 위해서는 L 부하의 동선을 Litz Wire로 대체하고, 출력 케이블을 동축 케이블이나 부스바를 설치함으로써 개선할 수 있다고 판단되며, 표피효과를 억제하고 고속 상승이 가능한 전원장치개발을 위한 추가 연구가 필요하다.

References

- [1] M. Incurvati, F. Burini, M. Farioli, G. Taddia et Alt., "Fast High-Power Power Supply for Scanning Magnet of CNAO Medical Accelerator"
- [2] Gerhard Breitenberger et Alt., "Power Supply for a Fast Scanning System"
- [3] B. Langenbeck, G. Breitenberger, H. Gaiser et Alt., "The Magnets and Power Supplies of the GSI Beam Scanning System for Heavy Ion Cancer Therapy"
- [4] Jiankun Sun, Jiaojiao Long, Simo He et Alt., "Manufacture of a Continuous Triangle-waveform Scanning Magnet Power Supply Used in Industrial Irradiation Acceleration"
- [5] Y. G. Kang, D. G. McGhee et Alt., "A Current-Controlled PWM Bipolar Power Supply for a Magnet Load"