

DC/DC 전력 강압 컨버터의 PWM 제어기 방사선 영향 Radiation Effects on PWM Controller of DC/DC Power Buck Converter

노영환^{1†}

Young Hwan Lho

Abstract DC/DC switching power converters produce DC output voltages from different DC input sources. The converter is used in regenerative braking of DC motors to return energy back in the supply, resulting in energy savings for the systems containing frequent stops. The DC/DC converter is composed of a PWM-IC (pulse width modulation integrated circuit) controller, a MOSFET (metal-oxide semi-conductor field-effect transistor), an inductor, capacitors, and resistors, etc. PWM is applied to control and regulate the total output voltage. In this paper, radiation shows the main influence on the changes in the electrical characteristics of comparator, operational amplifier, etc. in PWM-IC. In the PWM-IC operation, the missing pulses, the changes in pulse width, and the changes of the output waveform are studied by the simulation program with integrated circuit emphasis (SPICE) and compared with experiments.

Keywords : DC/DC converter, PWM, PWM pulse, MOSFET, radiation effects

초 록 DC/DC스위칭 전력 컨버터는 임의의 직류전원을 부하가 요구하는 형태의 직류전원으로 변환시킨다. DC/DC 컨버터는 PWM-IC를 이용하여 주기적으로 입력측에서 출력측으로 전달되는 에너지를 제어하는 기능을 수행하는데, PWM-IC(펄스폭 변조-집적회로), MOSFET(산화물-반도체 전계 효과 트랜지스터), 인덕터, 콘덴서, 저항 등으로 구성되어 있다. 방사선의 영향으로 DC/DC 컨버터의 PWM-IC 를 구성하는 비교기(comparator)와 연산 증폭기(OP-Amp.) 등 전자소자의 열화 효과(radiation effects)가 발생되는데, PWM-IC 동작에서 SPICE 시뮬레이션과 실험을 통해 펄스의 상실, 펄스폭의 변화, 그리고 출력파형의 변화를 연구하는데 있다.

주요어 : DC/DC 컨버터, PWM-IC, PWM 펄스, 산화물-반도체 전계효과 트랜지스터, 방사선 영향

1. 서 론

일본 후쿠시마 원전사고로 인한 방사선의 영향에 대한 우리들의 관심이 증대되어 있고, 우주환경이나 대기중의 방사선이 전자소자에 영향을 주어 부품에 열화효과(radiation effects)가 발생된다. 그래서 선진국들은 과거 50년 동안 전자소자 및 전력소자에 대한 연구를 산업체, 연구소, 그리고 학계에서 광범위하고 심도 있게 진행되어 방사선에 강인(radiation hardening) 기술은 안정화 단계라고 볼 수 있다. 또한, 방사선이나 온도 등 자연현상의 영향으로 전자소자의 수명이 단축되는데 방사선을 이용한 기술로 부품의 수명을 예측할 수 있고 신뢰성 연구에 많이 활용되고 있다. 상용 전자소자들은 방사선에 과다한 노출 시 부품자체의 동작에 문제를 야기 시킴으로 인하여 시스템에 영향을 준다. 이러한 영향은 방사선의 조사량(dose)과 조사율(dose rate), 그리고 방사선의 에너지에 따라 그 영향이 축적되다가 결국 전자부품을 파손시킨다.

DC-DC 컨버터는 전력변환을 수행하는데 있어 Buck(강압)[1], Boost(승압), Buck-Boost(강압-승압)로 크게 나누는데 임의의

직류전원을 부하가 요구하는 형태의 직류전원으로 변환시키는 장치이다. DC-DC 강압 컨버터에 사용되는 반도체 소자는 Diode(다이오드), Transistor(트랜지스터), MOSFET(산화물-반도체 전계 효과 트랜지스터), PWM IC(펄스폭 변조-집적회로), OP-Amp.(연산증폭기), Driver IC(구동 집적회로), Generator(발전기) 등이 사용된다. MOSFET는 입력 측에서 출력 측으로 전달되는 에너지를 제어하는 기능을 하며, PWM-IC는 16 핀을 가진 소자로서 입력전압을 인가하여 통류율에 따라 출력전압이 결정되도록 설계되고, 인덕터와 커패시터는 에너지를 전달하는 기능을 하거나 출력전압의 리플(ripple)을 제거하기 위해 필터 역할을 한다. 강압컨버터[2,3]에서 출력전압(V_0)과 입력전압(V_i) 사이에 관계는 등식 (1)과 같이 출력전압은 입력전압에 비례한다.

$$V_0 = DV_i \quad (1)$$

여기서 D 는 통류율(duty ratio)이고 값은 0에서 1까지 이다.

방사선의 형태는 일반적으로 소립자 방사선(particle radiation)과 광자 방사선(photon radiation)으로 나누어진다. 소립자 방사선은 하전입자와 중성자입자로 나누어지는데 하전입자는 전자, 양자, 알파, 이온입자들이며, 중성자입자는 중성자로 구성된다. 광자 방사선은 γ 선 및 x선으로 나누며, 광자 방사선의 영향을 받은 반도체 물질이나 부품은 과다한 매체

[†]교신저자 : 우송대학교 철도전기정보통신학부
E-mail : yhlho@wsu.ac.kr

¹우송대학교 철도전기정보통신학부

(carrier)를 발생시켜 특성이 변한다.

부품에 미치는 방사선의 영향은 크게 TID(Total Ionizing Dose)[4], Displacement Effect(변위 영향), SEE(Single Event Effects)로 나눌 수 있으며 SEE는 SEL(Single Event Latch-up), SEU(Single Event Upset), SET(Single Event Transient), SEGR(Single Event Gate Rupture) 등으로 나눈다. TID는 핵무기 폭발이나 Van Allan Belts에 형성된 전자나 양성자 혹은 γ 선 및 x선 같은 자연환경에서 야기될 수 있으며, SEE는 태양 풍입자(solar particles), 은하우주선(Galactic cosmic rays)으로 야기된다. 수동소자, diode와 bipolar의 구조를 가진 전자 소자는 일반적으로 TID 시험을 수행하고 회로설계에서 CMOS와 Bi-CMOS(bipolar와 CMOS 구조를 공유)구조를 가지는 PWM-IC, OP-Amp., 그리고 DRAM 등 메모리소자는 SEE 시험을 수행한다.

철도차량 등 산업분야의 전력시스템에 다양하게 사용되는 DC/DC 강압 컨버터에서 제어기능을 수행하는 PWM-IC의 방사선 영향에 대한 연구를 통해서 방사선에 강인한 전자소자를 검증할 수 있는 기술개발의 연구가 필요하다.

2. 방사선의 영향

Van Allen Belt 에는 지구의 자기장에 의해 형성된 소립자방사선의 하전입자가 존재한다. 전자는 35,000mile까지 펼쳐 존재하는 반면에 지구의 가장 가까이 있는 지역은 주로 양성자(proton)로 구성된다. 소립자 방사선을 나타내는 단위는 flux(수/cm²/sec) 이거나 fluence(수/cm²)이다. 광자 방사선에 의해 발생된 이온을 나타낼 때 단위는 rad(100ergs/g)이다.

방사선이 존재하는 환경에서 동작하는 트랜지스터의 전류이득 β 와 조사량(dose)의 특성을 예측할 수 있는 많은 실험식이 제안되었다. 일반적으로 조사 이전에는 NPN 트랜지스터의 β 값은 일반적으로 150 이상이며 1Mrad 이상의 조사량에 대하여 β 값은 약 30, PNP 트랜지스터 경우 20 정도 떨어지는 경향이 있다. 증성자에 조사 시 손실은 등식(2)와 같은 Messenger-Spratt[4]으로 편리하게 특징지어질 수 있다.

$$\frac{1}{\beta_{post}} = \frac{1}{\beta_{pre}} + 10^{-7} \frac{\Phi_n}{f_T} \quad (2)$$

여기서 β_{post} 는 방사선 조사 후 전류 이득이고 β_{pre} 는 방사선 조사 전 전류 이득이며 Φ_n 는 조사량이고 f_T 는 단위이득 주파수(unity gain frequency)이다. 등식(2)에서 PNP 트랜지스터의 정해진 f_T 값에 대해 조사량이 증가하면 전류이득 β_{post} 는 감소한다. 조사 실험에서 증성자는 성능저하(전류이득 저하)를 일으키는데 전류이득 저하는 콜렉터 전류가 아주 적은 동작영역에서 영향을 많이 받는다.

부품 성능시험 방법 및 절차는 Fig. 1과 같으며, 전자소자 전기적 특성을 평가하기 위해 코발트 60(⁶⁰Co)감마발생기로부터 부품에 조사하여 실험한다. 우리나라는 한국원자력연구원 정읍 방사선연구소에 감마 조사시설을 갖추고 있다.

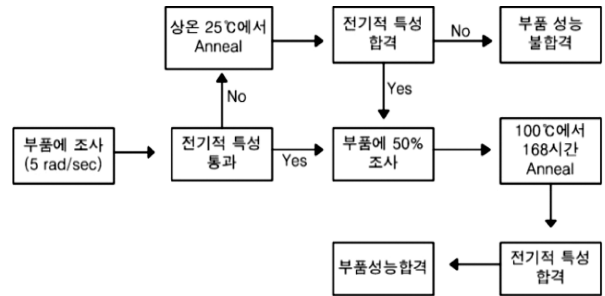


Fig. 1 Method and procedure for performance evaluation

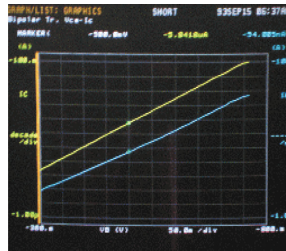


Fig. 2 Gummel Poon Model at pre-irradiation

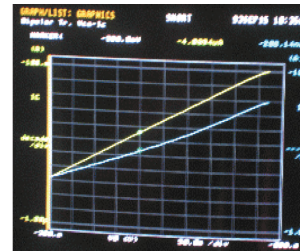


Fig. 3 Gummel Poon Model after 30krad dose

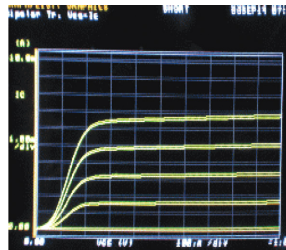


Fig. 4 Current gain(β) at pre-irradiation

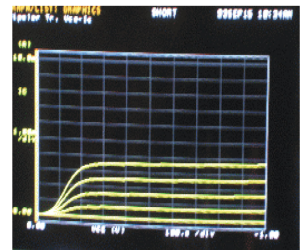


Fig. 5 Current gain(β) after 30krad dose

트랜지스터에서 조사량이 커질 때 방사선의 영향으로 소수 캐리어(minority carrier)들의 생존시간(life time)이 줄어들고 소자의 표면에 증성자 입자가 충돌하면서 표면상태(surface state)가 손상을 입는데, 손상을 입은 표면을 따라 누설전류가 증가하여 전류이득의 감소가 발생된다. 트랜지스터의 활성영역에서 동작은 컬렉터 전류는 컬렉터 전압에 달려있다. 이때 i_{C-VCE} 특성은 직선이 아니고 특성변화가 발생되는데, 방사선에 조사 시험을 실시한 결과 전압 v_{CE} 를 일정하게 놓고 v_{BE} 를 변수로 설정하여 i_B 와 i_C 를 동시에 측정할 수 있다. Fig. 2과 Fig. 3의 전류이득(β) 값을 Gummel Poon Model을 이용하여 동시에 표시함으로써 방사선이 존재할 때 트랜지스터의 전류이득 변화를 조사전과 조사후를 비교하는 것이 용이하다.

그리고 트랜지스터 i_{C-VCE} 의 조사전과 조사후의 전류이득을 Fig. 4과 Fig. 5와 같이 각각 184와 90을 보여주고 있으며, 전류이득의 변화가 조사전 184에서 조사후 90으로 떨어진다. 일반적으로 트랜지스터의 전류이득[5]은 150에서 200 사이이다.

3. 강압컨버터의 동작원리

출력전압은 평균전압이 직류성분 외에 구형파의 교류성분이 가미되어 있으나, 대체적으로 부하에서 필요로 하는 전원은 일정한 직류전원이므로 출력전원에 포함된 불필요한 교류성분을 제거해 주어야 한다. 이를 위해 출력의 직류성분은 통과시키고, 교류성분은 차단하는 저역필터(low pass filter) 회로가 필요하다. Fig. 6의 강압컨버터에서 인덕터(L)과 커패시터(C)가 이상적으로 매우 크면 정상상태에서 인덕터에는 일정한 전류가 흐르고 커패시터 양단에는 일정한 전압이 걸린다. 그러나 실제로 인덕터와 커패시터는 이상적이지 않으므로 인덕터 전류와 커패시터 전압은 리플 성분이 포함되어 있다.

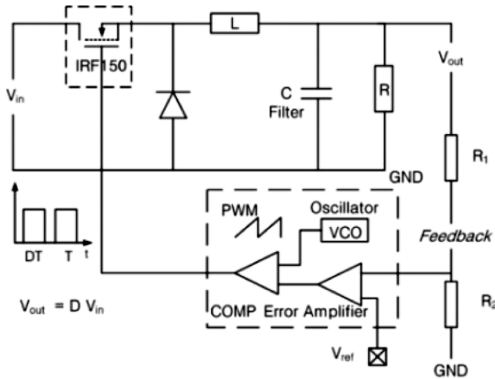


Fig. 6 Block diagram of buck converter

PWM은 펄스폭 변조방식의 약자로 펄스의 폭은 일정하게 두고 펄스의 통류율(duty ratio)로 제어하는 것을 의미한다. Fig. 7에서 MOSFET가 이상적이라 가정하면 MOSFET가 꺼질(turn-off)때 출력전압은 입력전압과 같고, MOSFET 동작(turn-on) 될 때 출력전압은 0이다.

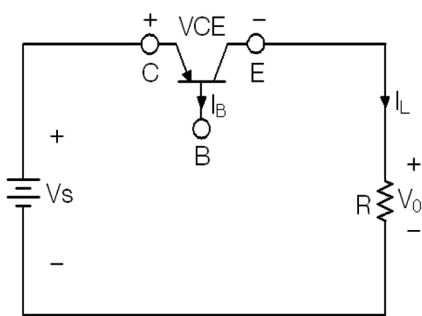


Fig. 7 Fundamental switching circuit

MOSFET를 주기적으로 turn-on과 turn-off 될 때 출력전압은 Fig. 8과 같은 펄스형태를 보여준다.

출력전압의 평균값 또는 직류성분은 등식 (3)과 같다.

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_0(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_S dt = V_S \times D \quad (3)$$

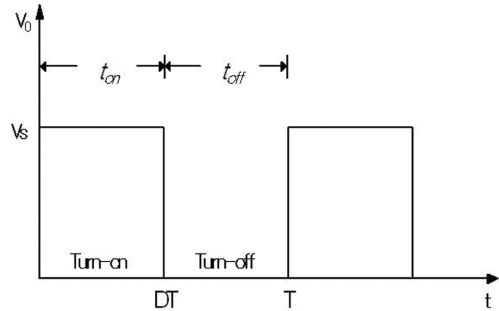


Fig. 8 Voltage waveform across load of resistor

출력의 직류성분은 통류율 D에 의해 제어된다. 통류율은 스위치가 닫힌 시간(ton)과 열린 시간(toff)의 전체시간 중 닫혀있는 시간의 비율로 등식 (4)과 같이 정의된다.

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} f \quad (4)$$

여기서, f는 스위칭 주파수이다. 이상적인 스위치에서는 전력이 소모되지 않는다. 스위치가 열려 있을 때 소자에는 전류가 흐르지 않으며, 스위치가 닫혀있을 때 소자양단에 전압이 걸리지 않으므로, 모든 전력은 부하에서 소모된다. 이때 에너지 효율은 100%가 된다. 실제 시스템에서 스위치가 닫혀있을 때 소자 양단의 전압이 0이 아니므로 스위치에서 손실이 발생된다. 스위치가 닫힌 상태에서 열린 상태로 바뀔 때 또는 열린 상태에서 닫힌 상태로 바뀔 때 손실이 발생된다. TI(Texas Instrument)사의 UC-2846 PWM-IC의 전기적 사양[6]은 Table 1과 같다.

Table 1 PWM-IC Electrical Specifications

PARAMETER	TEST CONDITIONS	UC2846			UNIT
		MIN	TYP	MAX	
Reference Section					
Output Voltage (Vref)	TJ = 25°C, IO = 1mA	5.05	5.10	5.15	V
Shutdown Terminal Section					
Threshold Voltage (Vth)	-	250	350	400	mV

4. 회로구현 및 실험결과

PWM-IC 는 입력전압을 인가하여 통류율에 따라 출력전압이 변화되는데 입력전압이 12V이 인가되어 통류율이 0.5 일 경우 6V, 0.3일 경우는 3.6V의 출력전압이 나오도록 설계되어야 한다.

Fig. 9은 UC 2846 PWM-IC[6]의 회로도를 보여주는데 주파수는 8번과 9번 단자로 등식 (5)와 같이 결정된다.

$$f = \frac{2.2}{RC} [hz] \quad (5)$$

여기서, R = 10kΩ과 C = 468nF를 적용할 경우 470hz의 주

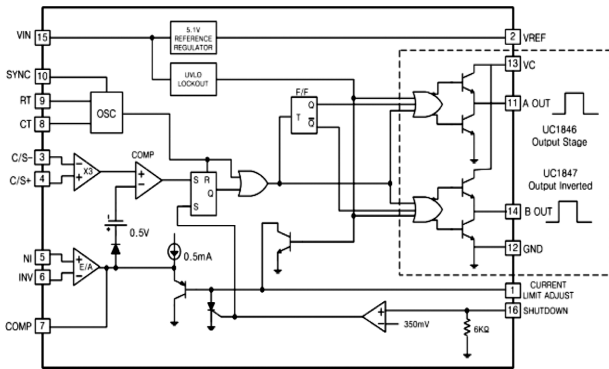


Fig. 9 Circuit of PWM-IC

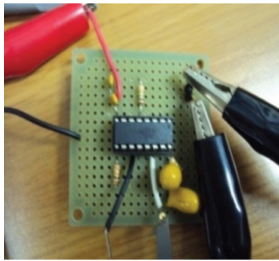


Fig. 10 Circuit for measuring PWM-IC

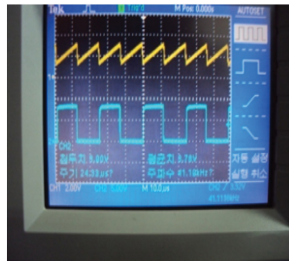


Fig. 11 Input and output of PWM-IC

파수가 발생된다. 출력파형은 단자 11번이나 14번을 이용하고 주파수는 8번과 9번 단자를 이용하여 Fig. 10로 구현하면 Fig. 11과 같이 입력 및 출력파형을 각각 측정할 수 있다. 6과 7번 단자가 short 되면 5번 단자의 신호가 출력으로 나오는데 2.2 ~ 4V가 E/A(Error Amplifier)에 인가된다. 예를 들어 4V인가 시 비교기(comparator)의 '-' 단자의 입력은 다이오드와 0.5V 전압을 고려할 때 2.8V가 인가된다. 4번 단자에 기준전압을 0.9V 설정할 때 기준전압보다 큰 값이 인가되면 R/S flip flop이 set 되어 'OR' 게이트 출력이 'OSC'의 출력 pulse 신호가 넘어가지 않고, 기준전압보다 적은 값이 인가되면 'OSC'의 출력 신호가 그대로 넘어간다. 8번 단자의 CT가 충/방전되는데 4번 단자에 전압 12V를 직접 인가하면 센서 증폭기에 전류가 흘러 들어가 영향을 주므로 바이폴라 트랜지스터(bipolar transistor)를 이용하여 전압을 궤환(feedback)시켜 영향을 최소화시키고 펄스의 폭을 조절하는 기능을 수행한다.

PWM-IC의 TID실험[4,9]을 위해 코발트 60(⁶⁰Co) γ 선을 조사실험에서 방사선 조사 시 시료는 6개를 사용하는데 조사율은 5rad/sec로 한국원자력연구원의 저준위 시설에서 조사량을 2.5, 5, 7.5, 10, 20, 30, 그리고 40krad 로 측정하여 7단계로 진행하고 시험절차는 MIL-STD-883, method 1019을 활용한다. 예를 들어 2.5krad를 조사하기 위해서는 조사율이 5rad/sec일 경우 500 초의 시간이 걸리고 단계별 시간 간격은 30분 이내로 진행된다.

Table 1에서 보여준 출력전압(output voltage)과 문턱전압(threshold voltage)은 PWM-IC의 가장 중요한 실험항목으로

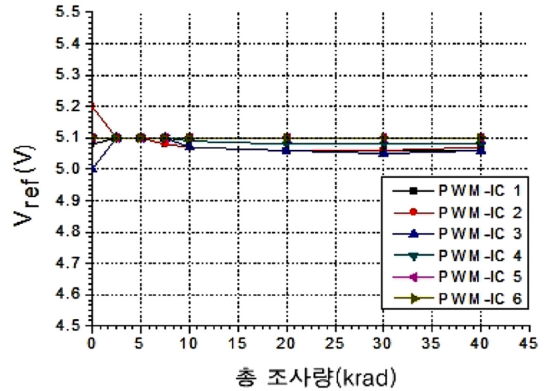


Fig. 12 Reference voltage(Vref) based on dose

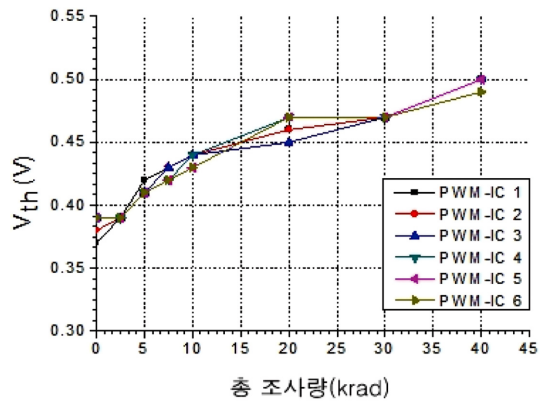


Fig. 13 Threshold voltage (Vth) based on dose

측정 결과 출력전압은 Fig. 12에서 보여주듯이 40krad까지 전기적 사양을 만족하나, 문턱전압은 5krad 조사량부터 약간 사양을 벗어남을 Fig. 13과 같이 확인할 수 있다.

PWM-IC 펄스의 상실과 펄스폭의 변화를 살펴보기 위해 Fig. 6의 강압컨버터의 동작원리를 이용하여 P-SPICE[7]로 시뮬레이션을 수행한 결과 PWM-IC 펄스의 상실(missing)과 출력파형의 주기의 변화에 대한 인덕터의 전류의 변화가 Fig. 14와 같이 발생된다.

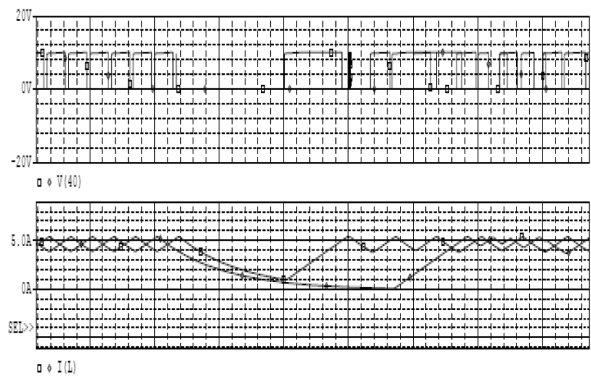


Fig. 14 Gate voltage of MOSFET, and the inductor current ($R_L=0.2\Omega$, $V_{ref}=1V$, $I_L=5A$)

여기서, 5개와 10개의 PWM 펄스가 상실될 때 각각 0.24ms와 0.5ms의 시정수로 인덕터 전류가 감소함을 보여주고 있다. 파형의 상실이 많을수록 인덕터 전류의 감소가 느리게 일어남을 확인할 수 있다.

PWM-IC의 SEL 실험을 위해 단자 11에 출력된 신호는 MOS Driver를 거쳐 게이트 단자에 연결되어 Fig. 15로 구현 후 실시간 처리(real time processing)를 수행할 때 출력 파형이 Fig. 16과 같이 펄스의 폭에 따라 Fig. 6의 출력전압(V_{out})이 발생된다. 이때 입력전압이 12V이고 D가 0.5일 때 출력전압은 6V임을 보여주고 있다. 16번 단자에 350mV 이상이면 PWM-IC는 shut down이 발생된다. Fig. 15는 한국원자력의학원(KIRAMS)의 cyclotron 가속기 M-50 시설에서 PWM-IC에 대한 proton의 영향을 측정하기 위한 SEL(single event latch-up) 조사장면과 Fig. 16은 실시간으로 PWM-IC 소자의 동작파형[9]을 보여주고 있다.

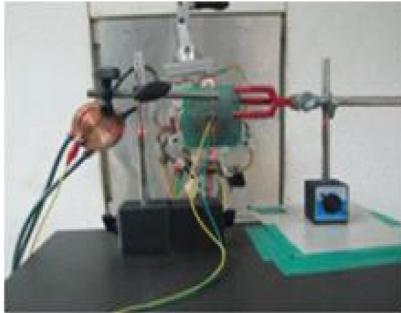


Fig. 15 PWM-IC SEL testing by proton Particle (KIRAMS)

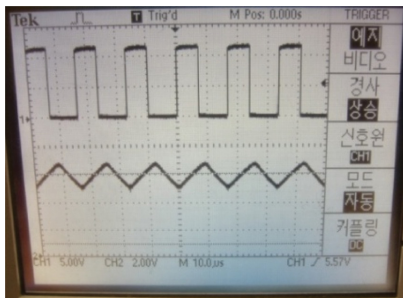


Fig. 16 Output waveform

PWM-IC 5개 시료를 40MeV 에너지에서 120초 동안 빔 세기 100nA까지 파형에 변화가 없었으나 빔 전류가 500nA에서 55초 후에 파형이 퍼지기 시작해 150초 후에 파형이 완전히 사라지고, 빔 전류가 1 μ A에서 90초 후에 2 μ A에서 40초 후에 파형이 사라짐을 확인하였다. 그에 대한 각각의 Fluence와 cross-section[10] 값은 Table 2와 같이 얻었다. 여기서 cross-section은 입자(particle)들 간에 반응하는 정도를 나타내는 지표인데 사건이 한번 일어나는 시간을 T(초)라고 하면 cross-section(σ)은 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma(\text{cm}^2) = 1/\text{Fluence}(\text{수}/\text{cm}^2) \quad (6)$$

여기서, Fluence는 단위면적당 방사선의 입자의 수를 나타

내며, 방사선의 세기 Flux와 반응시간의 곱으로 계산된다. 빔 전류가 각각 500nA, 1 μ A, 2 μ A 인가할 때 cross-section 값은 거의 일정한 값을 보여주고 있어 성공적인 실험을 수행하였다고 본다.

향후 우리나라에 과학벨트내 중이온가속기(heavy ions cyclotron)가 설치되면 4종류 이상의 heavy ion beams을 이용하여 CMOS(complementary metal-oxide semiconductor) 구조를 가진 전자소자의 방사선 특성실험을 LET(MeV/mg/cm²) 별 cross-section(cm²)[10]연구가 필요하고 활성화 되리라 본다.

Table 2 PWM-IC SEL experimental results

빔전류 (nA)	Flux (수/cm ² /sec.)	반응시간 (sec.)	Fluence (수/cm ²)	Cross-section (cm ²)
10	1.4E+09	> 120	1.7E+11	< 5.76E-12
100	1.2E+10	> 120	1.4E+12	< 6.90E-13
500	6.1E+10	150	9.2E+12	1.09E-13
1000	1.2E+11	90	1.1E+13	9.02E-14
2000	2.5E+11	40	9.9E+12	1.01E-13

5. 결 론

DC/DC 스위칭 컨버터 제어기능을 수행하는 PWM-IC의 방사선 영향을 연구하기 위해 PWM-IC의 회로를 설계하고 구현하였으며 TID 실험을 실시한 결과 기준전압은 전기적 특성을 만족하나 문턱전압은 5krad 이상의 조사량에서 약간 사양을 벗어남을 확인하였다. SEL 실험을 위해 PWM 펄스의 상실과 펄스폭의 변화에 대한 인덕터 전류의 변화를 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였고, 한국원자력의학원의 Cyclotron시설의 에너지 40MeV에서 빔 전류, 반응시간, 그리고 cross-section의 연구를 통하여 방사선이 존재하는 환경에서 PWM-IC 및 관련 전자소자의 방사선 영향평가를 실시할 수 있는 방법과 절차를 확립하였으며, 방사선에 강한 전자소자를 검증할 수 있는 기반을 구축하였다고 본다.

참고문헌

- [1] P.C. Adell, R.D. Schrimpf, W.T. Holman, et. al (2003) "Total-Dose and Single-Event Effects in DC/DC Converter Control Circuitry", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50(6), December.
- [2] Y.H. Lho (2011) "A Study on the Design of Voltage Mode PWM DC/DC Power Converter", *Journal of the Korean Society for Railway*, 14(5), October.
- [3] E.C. Roh, K.B. Jung, N.S. Choi (1997) *Power Electronics*, Moon Woon Dang, pp. 190-218 (in Korean).
- [4] Jim Schwank (2002) "Total Dose Effects in MOS Devices", *IEEE Nuclear Space Radiation Effects Conf., short course III-47*, July 2002
- [5] Datasheet of 2N2222A NPN switching transistors (1997)
- [6] Datasheet of UC 2846, Texas Instruments (2002)

- [7] Cadence Design Systems (2004) *SPICE reference Guide*, San Jose, CA, Cadence Design Systems, Inc.
- [8] S.H. Lee et al (2006) "Power Electronics Engineering", February, pp. 147-153 (in Korean).
- [9] A Technical Report (2010) "Development of Evaluation Technology of SEL Effects on Electronic Components for SPACE", National Research Foundation of Korea (in Korean).
- [10] N.W. Van Vonno, L.G. Pearce, G.M. Wood et al (2010) "Total Dose and Single Event Testing of a Hardened Single-Ended Current Mode PWM Controller", *IEEE Nuclear Space Radiation Effects Conf.*, July.
- 접수일(2012년 1월 16일), 게재확정일(2012년 2월 15일)