

# TID and SEL Testing on OP-Amp. of DC/DC Power Converter

Young Hwan Lho\*

Department of Railroad Electricity System, Woosong University

Received: February 20, 2017. Revised: April 25, 2017. Accepted: June 30, 2017

## ABSTRACT

DC/DC switching power converters are commonly used to generate a regulated DC output voltage with high efficiency. The advanced DC/DC converter uses a PWM-IC with OP-Amp. (Operational Amplifier) to control a MOSFET (metal-oxide semiconductor field effect transistor), which is a switching component, efficiently. In this paper, it is shown that the electrical characteristics of OP-Amp. are affected by radiations of  $\gamma$  rays using  $^{60}\text{Co}$  for TID (Total Ionizing Dose) testing and 5 heavy ions for SEL (Single Event Latch-up) testing. TID testing on OP-Amp. is accomplished up to the total dose of 30 krad, and the cross section( $\text{cm}^2$ ) versus LET( $\text{MeV}/\text{mg}/\text{cm}^2$ ) in the OP-Amp. operation is evaluated SEL testing after implementation of the controller board.

Keywords: OP-Amp., TID, SEL, SEE, PWM-IC

## I. INTRODUCTION

전자소자의 방사선 관련 기술은 미국 등 원자력 및 우주산업이 발달한 나라에서 미공개의 군사 관련 기술로 많은 개발이 이루어져 왔고 국가적인 차원에서 엄격히 관리하고 있어 기술이전을 기피하고 있는 핵심기술로 차세대 원자력 및 위성체의 부품 국산화를 위해 필수적으로 요구되는 첨단기술이다. 우리나라 원자력 및 위성 관련 부품산업은 다른 전자 및 기계 산업에 비해 낙후하며 초기단계이다. 부품의 방사선 강인(radiation hardening(RH))기술은 ‘방사선 영향에 강인한 부품 설계’, ‘부품 성능시험을 통한 방사선 영향에 강인한 부품 선별(parts selection)’, 방사선 영향을 적게 받도록 부분 차폐(spot shielding), 그리고 ‘방사선에 강인한 재료 사용’과 같이 4가지로 분류할 수 있다.

원자력 및 위성체의 부품에 미치는 방사선의 영향은 크게 TID (Total Ionizing Dose), Displacement Effect (변위 영향), SEE (Single Event Effect)로 나눌 수 있다.<sup>[1,2]</sup> TID는 핵무기 폭발이나 Van Allan Belts에 형성된 전자나 양성자 혹은  $\gamma$  선 및 x선 같은 자연환경에서

야기될 수 있다. 그리고 proton이나 이온 입자를 이용하는 SEE 실험은 방사선의 영향으로 P-N-P-N 구조가 turn-on 된 상태로 과전류가 흘러 소자로서 기능을 상실하는 SEL(Single Event Latch-up), 소자의 회로가 타는 SEB(Single Event Burnout), 게이트(gate) 구조를 가지는 소자에서 전류가 많이 흘러 게이트가 파괴되는 SEGR (Single Event Gate Rupture), 데이터의 상태변화를 클럭(clock) 주파수에 관계없이 오류 개수를 측정하는 SEU (Single Event Upset), 회로가 방사선의 영향으로 손상을 입고 어떤 입력신호에 대하여 출력신호의 로직 값이 제대로 나오지 않는 SET(Single Event Transient) 등으로 나눈다. 부품별 실험<sup>[2]</sup>에서 스위칭기능을 수행하는 MOSFET는 TID와 SEGR, OP-Amp.는 TID와 SEL, Diode는 TID, Transformer와 Capacitor는 TID와 Displacement Effect, 메모리소자인 DRAM과 SRAM은 TID와 SEU 실험을 수행한다.<sup>[2]</sup>

방사선의 형태는 일반적으로 소립자 방사선(particle radiation)과 광자 방사선 (photon radiation)으로 나누어진다. 소립자 방사선은 하전입자와 중성자입자로 나누어지는데 하전입자는 전자, 양자, 알파, 이온 입자들이며,

\* Corresponding Author: Young Hwan Lho E-mail: yhlho@wsu.ac.kr  
Address: 171, Dongdaejon-ro, Dong-gu, Daejeon, Korea, 300-718

중성자입자는 중성자로 구성된다. 광자 방사선은  $\gamma$ 선 및 x선으로 나누며, 광자 방사선의 영향을 받은 반도체 물질이나 부품이 과다한 매체 (carrier)를 발생시켜 특성이 변한다. 광자 방사선에 의해 발생된 이온을 나타낼 때 단위는 rad [100 ergs/g]이고, 소립자 방사선을 나타내는 단위는 flux (ions/cm<sup>2</sup>·sec)이거나 fluence (ions/cm<sup>2</sup>)이다. 입자(particle) 들 간에 반응하는 정도를 cross section이라 하는데 사건이 한번 일어나는 시간을 T(sec.)라고 하면 cross section<sup>[3]</sup>은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\sigma(\text{cm}^2) = \frac{1}{\text{fluence}} (\text{ions/cm}^2) \quad (1)$$

Van Allen Belt 에는 지구의 자기장에 의해 형성된 전하입자가 존재한다. 전자는 35,000 mile 까지 펼쳐 존재하는 반면에 지구의 가장 가까이 있는 지역은 주로 양성자(proton)로 구성된다. 지역의 양성자와 전자는 일반적으로 위성체의 방사선 문제와 관련이 있다. 최대 양성자 flux는 cm<sup>2</sup> 당 1×10<sup>2</sup> 개이다. 이것은 조사를 0.001 rad/sec에 해당되며 전자 flux는 cm<sup>2</sup> 당 1×10<sup>10</sup> 개이고 최악의 상태에서 0.028 rad/sec에 해당된다.<sup>[3,4]</sup>

방사선이 존재하는 우주환경에서 동작하는 트랜지스터의 전류이득  $\beta$ 와 조사량(dose)의 특성을 예측할 수 있는 많은 실험식이 제안되었다. 중성자(neutron) 조사 시 전류이득 손실은 Messenger-Spratt<sup>[4]</sup> 등식 (2)로 표현된다.

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

여기서  $\beta_{\text{post}}$ 는 방사선 조사 후 전류이득이고,  $\beta_{\text{pre}}$ 는 조사 전 전류이득,  $\phi_n$ 은 조사량, 그리고  $f_T$ 는 단위 이득 주파수(unit gain frequency)이다.

트랜지스터의 소자 시험을 수행하기 전 Microsim사의 회로 시뮬레이터인 P-SPICE에서는 중성자에 조사(irradiation) 되었을 때 바이폴라 트랜지스터 (BJT, Bipolar Junction Transistor)의 특성에 대한 모델을 이용한다. Fig. 1에서 중성자의 조사량을 2.5×10<sup>12</sup>, 3.6×10<sup>12</sup>, 1.0×10<sup>13</sup>, 2.1×10<sup>13</sup>, 1.0×10<sup>14</sup>개/cm<sup>2</sup>일 때 컬렉터 전류와 전류이득의 관계를 보여주고 있다. Q2N2222 N

PN형 바이폴라 트랜지스터는 중성자 조사이전에는 일반적으로  $\beta$  값은 100에서 200 사이의 전류이득을 갖고 있으며 1 Mrad 이상의 조사량에 대하여  $\beta$  값은 약 30, PNP 값은 20 정도 떨어지는 경향이 있고, 조사되는 중성자의 조사량이 증가하면서 전류이득이 현저하게 줄어들고 특히 컬렉터 전류가 적은 영역에서는 이득의 감소가 더욱 두드러진다.

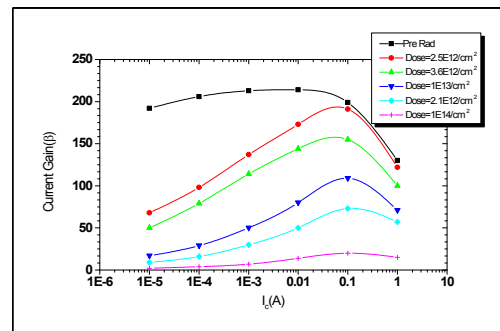


Fig. 1. Relationship between collector current( $I_C$ ) and current gain( $\beta$ ) in terms of radiation dose.

## II. MATERIAL AND METHODS

연산증폭기(OP-Amp.)<sup>[5,6]</sup>는 두 입력단자에 인가된 전압신호의 차를 감지하고, 이 값에 대한 이득(A)을 곱한 후, 그 결과를 출력단자에 나타내도록 만들어져 있다. 실제 연산증폭기는 이상적일 수 없어 제조사와 사용용도에 따라 다르다. Table 1은 Texas Instruments(TI)사의 LM193<sup>[6]</sup>의 전기적 사양이다.

Table 1. Electrical characteristics of OP-Amp.(LM193)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	$T_A$	LM193			UNIT
			MIN	TYP	MAX	
$V_{io}$	$V_{OC} = 50V$ to 30V $V_{IC} = V_{IC}(\text{min})$	25 ° C	2	5		mV
$I_{io}$	$V_o = 1.4V$	25 ° C	3	25		nA
$I_{IB}$	$V_o = 1.4V$	25 ° C	-25	-100		nA
$A_{VD}$	$V_{CC} = 15V$ $V_o = 1.4V$ to 11.4V $R \geq 15K\Omega$ to $V_{OC}$	25 ° C	50	200		V/mA
$V_{ICR}$		25 ° C	0 to $V_{OC}$	-1.5		V

Fig. 2의 DC/DC 강압컨버터<sup>[7,8]</sup>에서 OP-Amp.를 실장한 PWM-IC는 스위칭 소자인 MOSFET를 제어한다. CMOS와 Bi-CMOS(bipolar와 CMOS 구조로 구성) 구조를 가지는 OP-Amp. 와 PWM-IC 등 메모리 소자는 TID 실험을 수행한 후 전기적 특성을 만족하면 다음 단계로 SEL 시험을 수행한다.

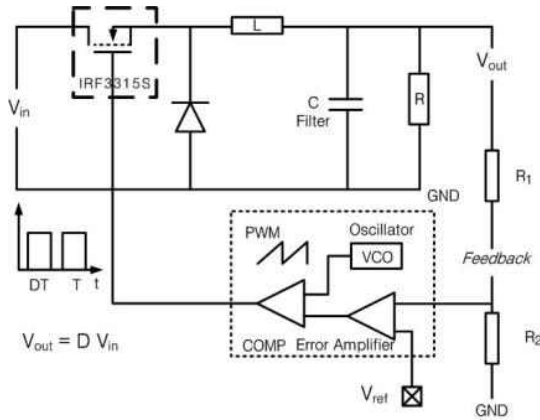


Fig. 2. Block diagram of DC-DC Buck Converter.

## 1. 측정 항목

### 1.1 Input offset voltage ( $V_{IO}$ )

Fig. 3의 입력전압  $V_i$ 를 2.4 V로부터 2.6 V 범위에서 1 mV 씩 증가시켜 출력전압이 변화되는데  $V_o$ 가 1.4 V 일 때  $|V_{in} - 2.5|$ 의 전압이다.

### 1.2 Input offset current ( $I_{IO}$ )

Input offset voltage를 측정하는 동일한 조건에서 반전(inverting) 단자와 비반전(non-inverting) 단자에서 전류차의  $|I_- - I_+|$ 크기이다.

### 1.3 Input bias current ( $I_{IB}$ )

$V_o$ 가 1.4 V 일 때 반전단자와 비 반전단자에서 전류의 평균값,  $\frac{I_+ + I_-}{2}$ 로 측정된다. 조사량이 증가됨에 따라  $I_{IB}$ 의 전류 크기가 음의 값으로 증가되어야 한다.

### 1.4 Common-mode input voltage range ( $V_{ICR}$ )

반전(-) 단자와 비 반전(+) 단자에 입력전압을 0 V 부터 동시에 증가시켜  $V_{CC} - 1.5V$  즉 8.5 V에서 입력 bias 전류가 변화되는 전압이다.

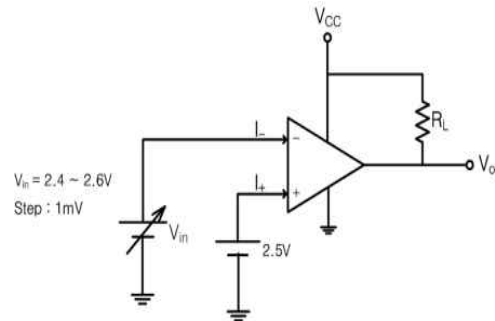


Fig. 3. Circuit for measuring input offset voltage, input offset current and input bias current.

### 1.5 Large-signal differential-voltage amplification ( $A_{VD}$ )

Fig. 4의 입력전압  $V_{in}$ 을 2.4 V로부터 2.6 V 범위에서 1 mV 씩 증가시켜 OP-Amp. 의 비 반전단자에 인가된  $V_i \frac{R_1}{R_1 + R_2}$  값과 반전단자 전압과의 차이와 출력 전압의 변화의 비, 즉  $\frac{\Delta V_o}{\Delta V_i}$ 를 측정한다. 여기서 저항  $R_1$ 은 2.2 M $\Omega$ 이고  $R_2$ 는 4.7 K $\Omega$ 이다.

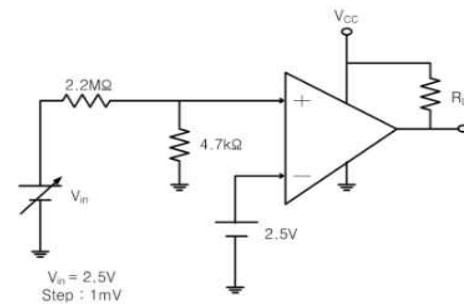


Fig. 4. Circuit for measuring large-signal differential-voltage amplification.

## 2. 실험 종류

### 2.1 TID 실험

TID 실험절차는 Mil-Std-883 Method 1019<sup>[9]</sup>를 따르는데 이것은 한국항공우주연구원이 개발한 다목적 실용 위성2호(KOMPSAT-2)에서 적용되는 K2-RAD-IGG-0001와 같다. 측정 장비로는 반도체 소자의 측정 장비인 HP Semiconductor Parameter Analyzer과 Digital Multimeter를 사용한다. 조사시설로는 한국원자력연구원 정음방사선연구소의 저준위 방사선 조사실의 Fig. 5와 같이 코발트 60 ( $^{60}\text{Co}$ )  $\gamma$  발생기를 이용한다. 여기서  $\gamma$

봉과 조사시료의 거리가 가까우면 조사시간이 짧아지고  $\gamma$ 봉과 조사시료의 거리가 멀어지면 조사시간을 길게 하여 총 선량이 같게 한다. 시료는 바닥에서 12cm 높이에서  $\gamma$ 선 조사가 균등하게 받도록 Fig. 5와 같이 직각으로 배치후 시료와  $\gamma$ 봉과의 거리가 5.7cm 이격하여 선량율(조사율)은 저 준위 조사 시 많이 사용하는 5 rad/sec로 설정하였다.



Fig. 5. The  $\gamma$  facility at KAERI for testing OP-Amp. and MOSFET.

### 2.2 SEL 실험

OP-Amp.의 SEL 실험을 위해 Fig. 6과 같이 회로를 설계 및 구현한 후 NASA 등 산업체가 많이 이용하고 세계적으로 가장 권위 있는 미국 Texas A&M University Cyclotron Facility의 중이온가속기<sup>[10]</sup>에서 Fig. 8과 같이 실험하였다. 이때 Fig. 6에서 OP-Amp. 시료를 DUT(device under test) 수행하기 위해 주변회로를 구현하여 이득을 측정한다. 에너지는 Fig. 7 에서 보여준 15 A MeV/u 중이온 가속기 에서 10 종류를 활용할 수 있는데 산업체에서 실험으로 가장 많이 사용되는 Table 2의 중이온 5종(Ar, Kr, Xe, Ho, Au)을 bare chip 상태의 시료에 조사하였다. 중이온이 증가될 때 이득(gain)이 줄어드는데 측정한 결과 Table 3의 비교에 제시한 시간이 경과한 후 순간적으로 bias 과전류(over-current)가 흘러 SEL이 발생된다.

Table 2. Ions' spec. of 15MeV/u energy.

Ion	Mass(u)	Total Energy(MeV)	Initial LET(air)	LET at Bragg Peak
<sup>40</sup> Ar	39.962	599	8.0	20.1
<sup>84</sup> Kr	83.912	1259	26.6	41.4
<sup>129</sup> Xe	128.905	1934	49.3	63.4
<sup>165</sup> Ho	164.930	2474	66.7	79.2
<sup>197</sup> Au	196.967	2954	82.8	93.5

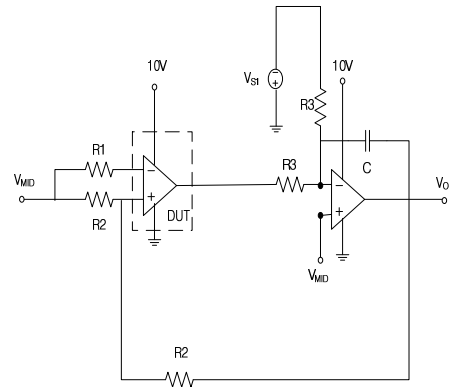


Fig. 6. Circuit for measuring open loop gain.

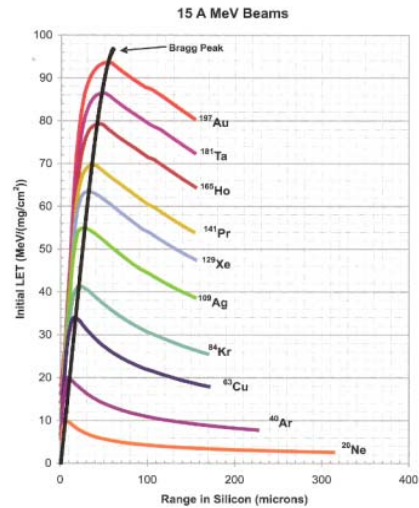


Fig. 7. 15 A MeV Beams of Texas A&M University Radiation Facility.

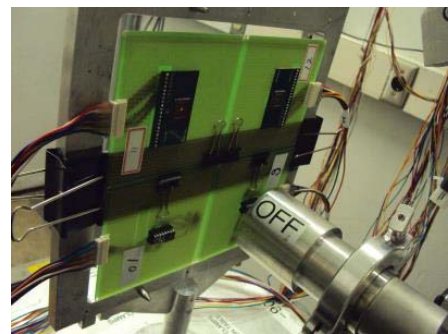


Fig. 8. LM193 irradiated by heavy ions (Texas A&M Univ. Cyclotron Facility, USA).

## III. RESULT

OP-Amp. 부품에 미치는 방사선의 영향에 관한 실험

은 NASA에서 제시한 TID와 SEL실험을 수행한다.

### 1. TID 실험

조사량은 2.5, 5, 7.5, 10, 20, 그리고 30 Krad까지 6 등급으로 구분한다. 총 조사선량은 조사율, 거리, 그리고 시간에 따라 결정되는데, 예를 들어 2.5 Krad가 4회 누적되면 10 Krad가 되고 10 Krad가 2회 누적되면 20 Krad로서 총 선량은 30 Krad가 된다. Fig. 8~12에서 보여준 30 krad 조사량까지 Table 1의 사양을 만족하고 있으며, input bias current는 조사량이 증가함에 따라 음의 전류 값이 증가됨을 보여 주고 있어 크기를 만족하고 있다.<sup>[9]</sup>

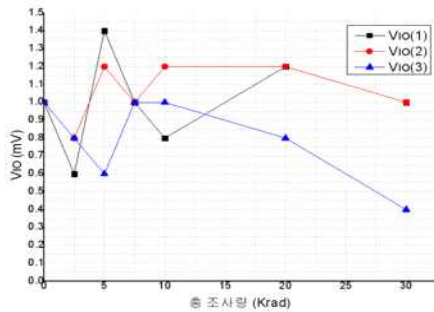


Fig. 9. Input offset voltage.

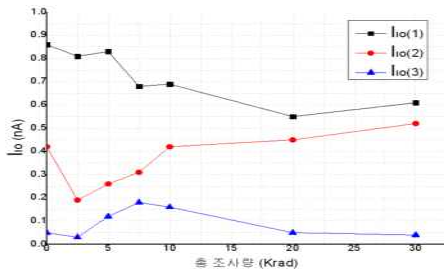


Fig. 10. Input offset current.

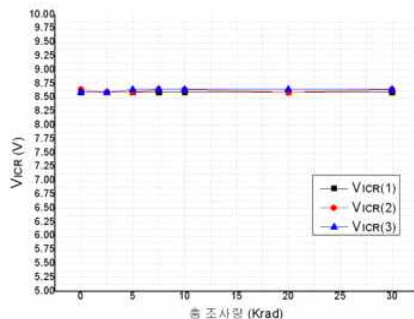


Fig. 11. Common-mode input voltage range.

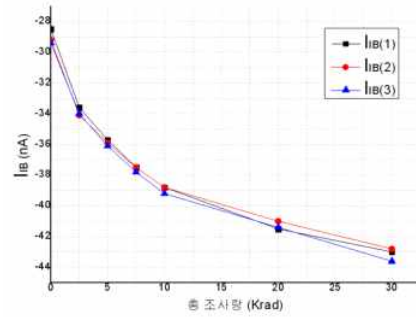


Fig. 12. Input bias current.

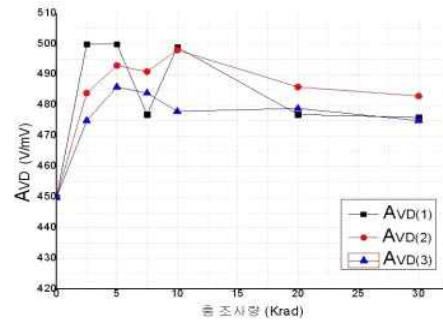


Fig. 13. Large-signal differential-voltage amplification.

### 2. SEL 실험

SEL 실험결과는 Table 3과 같이 시료 1과 2를 중이온 질량이 40인 <sup>40</sup>Ar에 조사 시 9분 36초와 11분 54초에 SEL이 발생되었고 질량을 증가시켜 시료 3과 4를 <sup>84</sup>Kr, 시료 5와 6을 <sup>129</sup>Xe, 시료 7과 8을 <sup>165</sup>Ho, 시료 9와 10을 <sup>197</sup>Au에 조사시켜 비교에 표기된 시간에 SEL이 발생되었다. Fig. 14는 중이온 5종의 LET (Linear Energy Transfer)별 cross section을 나타내고 있다.

Table 3. SEL(dropout) status of OP-Amp.

SAM- PLE	LET(MeV /mg/cm <sup>2</sup> )	Fluence (ions/cm <sup>2</sup> )	Cross Section(cm <sup>2</sup> )	SEL Event	Remarks
1	8.9	1.81 × 10 <sup>8</sup>	5.52 × 10 <sup>9</sup>	occurred	9min 36sec
2	8.9	2.26 × 10 <sup>8</sup>	4.42 × 10 <sup>9</sup>	occurred	11min 54sec
3	40	2.14 × 10 <sup>7</sup>	4.67 × 10 <sup>8</sup>	occurred	1min 11sec
4	40	1.67 × 10 <sup>7</sup>	5.99 × 10 <sup>8</sup>	occurred	1min 02sec
5	56	2.31 × 10 <sup>7</sup>	4.33 × 10 <sup>8</sup>	occurred	1min 13sec
6	56	2.74 × 10 <sup>7</sup>	3.65 × 10 <sup>8</sup>	occurred	1min 27sec
7	69	2.39 × 10 <sup>7</sup>	4.18 × 10 <sup>8</sup>	occurred	39sec
8	69.1	2.23 × 10 <sup>7</sup>	4.44 × 10 <sup>8</sup>	occurred	32sec
9	85	1.45 × 10 <sup>7</sup>	6.90 × 10 <sup>8</sup>	occurred	41sec
10	85.4	1.31 × 10 <sup>7</sup>	7.63 × 10 <sup>8</sup>	occurred	42sec

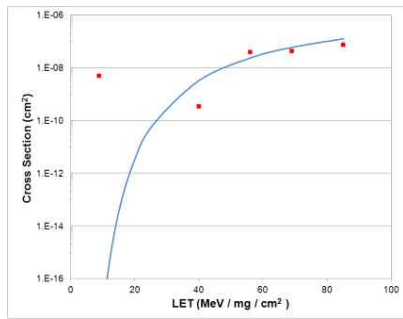


Fig. 14. Cross section vs. LET for OP-Amp. (■; dropout capture, LET<sub>th</sub> = 11 MeV/mg/cm<sup>2</sup>)

#### IV. DISCUSSION

조사율을 5 rad/sec로 설정 시 조사량이 2.5 krad가 되기 위해서는 500 sec(초) 소요되고 3개의 시료를 사용한다. 각 조사 횟수가 끝나고 다음 조사로 들어가기 위해 필요한 조사간격은 30분 이내에 이루어져야 한다. 30분이 경과되면 시료의 전기적 특성이 어느 정도 복원될 수 있기 때문이다.

입력 offset 전압은 내부의 차동 입력 회로를 구성하는 트랜지스터의  $V_{BE}$ (base와 emitter간 전압) 차이에 의하여, 두 단자간의 신호가 없을 때 차이 전압으로 수 mV 이내로 미소하지만, 회로의 용도에 따라서 무시할 수 없는 경우가 있다. 입력 offset 전류는 연산증폭기의 입력단자에서 미세한 전류차이가 원인이 되어 입력단자에 흐르는 입력 바이어스 전류의 차이이다. 이때 조사 시 fluence가 측정되어 식 (1)로부터 cross section을 계산할 수 있다. 이때 cross section 값은  $1 \times 10^{-7}$  (cm<sup>2</sup>)미만 값으로 수렴함을 보여주고 있다. 실험 결과 cross section의 수렴성은 각 시료의 전기적 특성을 평가하는데 중요한 부분이다.

본 논문에서 실험한 LM193 부품은 방사선 실험 결과 전기적 특성을 만족하므로 저궤도 위성체용 DC-DC buck converter에 실장 되어 증폭기로 사용이 가능하다고 평가한다.

#### V. CONCLUSION

설계에서 Bi-CMOS 구조를 가지는 OP-Amp.에 대하여 코발트 60 (<sup>60</sup>Co) 감마발생기를 활용하여 30 krad 조사량까지 TID 실험을 수행하였으며, OP-Amp.의 S

EL 평가를 에너지 15 MeV/u 인 중이온 가속기에서 중이온 5종(Ar, Kr, Xe, Ho, Au)을 이용하여 bare chip으로 LET(MeV/mg/cm<sup>2</sup>) 별 cross section(cm<sup>2</sup>) 실험을 성공적으로 수행하였다. 향후, 본 연구결과를 바탕으로 차세대 위성체의 부품국산화 추진에서 내방사선 특성 및 평가기술로 활용될 수 있고 우주용 전자부품 영향평가 기술 개발의 기반을 마련하였다고 본다.

#### Acknowledgement

This work was supported by Institute for Information & communications Technology Promotion (IITP) grant funded by the Korea government(MSIP) (No. 2015-0-00847, Form factor-free Multi Input and output Power Module Technology for Wearable Devices)

#### Reference

- [1] P. C. Adell et. al, "Total-Dose and Single-Event Effects in DC/DC Converter Control Circuitry", IEEE Transactions Nuclear Science, Vol. 50, No. 6, December, 2003.
- [2] NASA Microelectronics Technology Directions, 2004.
- [3] Radiation Effects Research Program at IUCF Newsletter, March 2003.
- [4] Rene Donaldson, M. G. D. Gilchrisese, Proceedings of the Workshop on Calorimetry for the Supercollider, University of Alabama, Tuscaloosa, Alabama, pp. 575, 1989.
- [5] Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith, "Microelectronics Circuits", SAUNDERS COLLEGE PUBLISHING, pp. 470-476, 2002.(in Korean)
- [6] Data sheet of LM193, Texas Instruments
- [7] N. W. Van Vonno, L. G. Pearce, G. M. Wood et. al, "Total Dose and Single Event Testing of a Hardened Single-Ended Current Mode PWM Controller", NSREC, July, 2010.
- [8] E. C. Roh, K. B. Jung, N. S. Choi, "Power Electronics", Moon Woon Dang, pp. 190-218, 1997.(in Korean)
- [9] A Technical Report, "Development of Evaluation Technology of SEL Effects on Electronic Component for SPACE", National Research Foundation of Korea, 2011.

(in Korean)

[10] Radiation Effects Facility, Cyclotron Institute, Texas  
A&M University

## DC/DC 컨버터용 OP-Amp.의 TID 및 SEL 실험

노영환

우송대학교 철도전기시스템학과

### 요 약

DC/DC 컨버터는 임의의 직류전원을 부하가 요구하는 형태의 직류전원으로 변환시키는 효율이 높은 전력변환기이다. 고급형 DC/DC 컨버터는 MOSFET(산화물-반도체 전계 효과 트랜지스터)를 제어하기 위해 OP-Amp.(연산 증폭기)를 실장한 PWM-IC(펄스폭 변조 집적회로)를 사용한다. OP-Amp.는 증폭기 기능을 수행하는데 방사선 영향으로 전기적 특성이 변화하는데 본 논문에서는 코발트 60 ( $^{60}\text{Co}$ ) 저준위 감마발생기를 이용한 TID실험과 5종류의 중이온 입자를 이용하여 SEL 실험을 수행하는데 바이어스(bias) 전류가 순간적으로 과전류가 흘러 SEL이 발생된다. OP-Amp.의 TID 실험은 조사율은 5 rad/sec.로 전체 조사량을 30 krad 까지 수행하였으며, SEL 실험은 제어보드를 구현한 후 LET(MeV/mg/cm<sup>2</sup>)별 cross section(cm<sup>2</sup>)을 이용하여 성능평가를 하는데 있다.

중심단어: 연산 증폭기, 전체 이온화 량(TID), 단위사건 파괴(SEL), 단위사건 영향(SEE), 펄스폭 변조 집적회로