

상용 반도체 소자를 이용한 내방사선 원전 센서신호 공통회로 연구

The Study of Radiation Hardened Common Sensor Circuits using COTS Semiconductor Devices for the Nuclear Power Plant

김 종 열[†] · 이 남 호^{*} · 정 현 규^{*} · 오 승 찬^{**}
(Jong-Yeol Kim · Nam-Ho Lee · Hyun-Kyu Jung · Seung-Chan Oh)

Abstract - In this study, we designed a signal processing module using a radiation hardened technology that can be applied to the all measurement sensors inside nuclear power plant containment. Also, for verification that it can be used for high-level radiation environment (Harsh environmental zone inside containment of NPP), we carried out evaluation tests for a designed module using a Co⁶⁰ gamma-ray source up to 12 kGy(Si). And, we had checked radiation hardening level that it has been satisfied up to 12 kGy(Si).

Key Words : Radiation hardened, Total ionizing dose effects, Nuclear power plant

1. 서 론

원전 격납건물 내의 공정계측용 전자기기는 설계기준사고 및 중대사고 조건을 고려한 기기검증절차를 통하여 내환경 조건을 만족해야 한다. 후쿠시마 원전 사고 이후 이러한 중대사고 조건에서 원전내의 전자기기의 생존성 문제는 더욱 중요 시 되고 있다.

방사선 환경에서 전자기기를 구성하는 반도체 소자는 방사선 종류, 총 누적선량, 방사선 플럭스(Flux), 방사선 형태의 조합에 따른 중성자 영향(Neutron effects), 총 이온화선량 효과(Total ionizing dose effects), 과도선량률 효과(Transient dose rate effects), 단일사건 현상(Single event phenomena) 등과 같은 다양한 오류를 유발한다[1, 2]. 이러한 반도체 소자의 방사선 영향 중 원전 내의 방사선환경 측면에서 주로 고려되는 사항은 감마선에 의한 총 이온화선량 효과로 격납건물 내의 설치위치별 명시된 설계요건에 따라서 총 누적선량 1.0×10^4 Gy ~ 2.3×10^5 Gy 조건에서 기기의 주요 동작을 포함한 계측의 신뢰도를 만족해야 한다[3].

국내의 전자기기에 대한 내방사선 관련 연구는 1997년 한국표준과학연구원에서 “방사선 차폐 전자공학기술조사” 연구를 통한 사전기술조사와 한국항공우주연구원의 다목적 실용위성을 제작하기 위해 미국의 TRW와 기술협력이 이루어졌으며, 한국원자력연구원에서는 CMOS 소자 및 상용 전자소자의 방사선 영향 연구를 수행하였다[4, 5]. 하지만 전자기기의 체계적인 내방사선화를 위한 연구는 사실상 미비한 실

정이다. 현재 국내 원전에 적용되는 공정계측용 센서 트랜스미터 제품은 일부 방사선 환경에 덜 민감한 온화한 환경 구역(Mild environmental zone)을 제외한 원전 내 극한 환경 구역(Harsh environmental zone)은 대부분 국외제품을 적용하고 있으며, 아날로그 방식의 회로 설계기술을 채택하여 5.19×10^5 Gy 이상의 높은 내방사선 특성을 가지고 있다[6].

본 연구에서는 고준위 방사선 환경인 원전 내 공정계측 시스템을 대상으로 공정계측용 센서에 공통적으로 적용이 가능한 펄스폭 변조(PWM, Pulse width modulation) 방식의 센서 신호처리방법을 제안하고, 이를 기반으로 COTS(Commercial-Off-The-Shelf) 소자로 구성된 내방사선 센서 신호처리회로를 설계하였다.

2. 원전 공통 센서신호처리 회로 설계

2.1 원전 센서 공통회로 모듈 설계

원전 1차 계통의 핵증기 공급계통의 건전성 감시계통에 적용되는 공정계측 센서는 크게 압력, 온도, 수위, 유량 센서로 구분되며 각각의 센서로 부터 측정된 변수는 전기적신호(4 ~ 20 mA)로 변환되어 공정제어/보호/감시계통으로 전달된다[7]. 원전 안전계통에 설치된 압력, 온도, 수위, 유량 센서는 크게 센서의 정전용량 변화량과 저항 값 변화량 측정 방식으로 구분할 수 있다. 정전용량과 저항 값을 동시에 처리할 수 있는 회로기능을 구현하면 안전계통 센서에 대해 공통적으로 적용할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 센서의 주요 특징인 정전용량 값과 저항 값을 입력으로 하는 PWM 방식의 센서 신호처리방법을 기반으로 센서의 변화량에 비례하는 출력특성을 처리할 수 있는 센서 공통회로를 설계하였다.

2.1.1 반도체 소자의 방사선 영향

COTS 반도체 소자 가운데 CMOS 계열은 누적방사선량

[†] Corresponding Author : Dept. of Nuclear Convergence Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea.

E-mail: kimjr@kaeri.re.kr

^{*} Dept. of Nuclear Convergence Technology Development, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea.

^{**} R&D Center, ShinwooEND Inc., Korea.

Received : June 05, 2014; Accepted : August 18, 2014

기준으로 100~500 Gy(Si) 범위를 초과할 경우 시스템을 구성하는 각 반도체소자의 주요한 전기적 특성변화요인이 발생하여 오작동이나 주요기능이 정지되는 현상을 보인다. 바이폴라(Bipolar) 계열의 선형소자는 누적 방사선량 효과가 CMOS 계열에 비해서 강한 특성을 가지고 있으며 이러한 소자의 방사선에 의한 전기적 특성변화는 이득(Gain) 감소와 문턱전압(VTH)변화, 누설전류의 증가로 나타난다[8]. 따라서 고방사선 환경용 전자회로는 바이폴라 계열의 소자를 이용하여 방사선에 기인한 전기적 특성변화를 고려한 여유 설계(Margin design) 기법을 적용하면 내방사선 특성을 크게 개선시킬 수 있다.

2.1.2 센서공통회로 모듈 설계

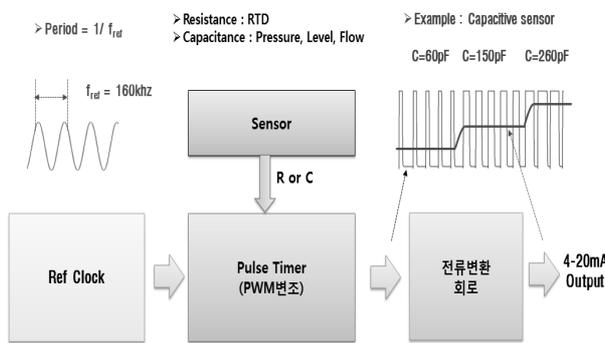


그림 1 공통센서 신호처리회로 구성
 Fig. 1 Circuit configuration for the common sensor signal processing circuit

원전 내 공정계측용 센서에 적용 가능한 공통신호처리 모듈에 대한 성능 기준은 고정된 센서입력 조건을 기준으로 정상상태 출력기준 Full-scale 대비 $\pm 10\%$ 범위 이내의 신뢰도 범위에서 MIL-PRF-19500P[9]에 명시된 내방사선 등급인 H 등급(1 Mrad(Si))을 기준으로 내방사선화 설계목표를 설정하였다. RHA-H 등급을 만족하는 내방사선 기술은 원전내의 여러 분야에 적용이 가능할 뿐만 아니라 우주분야 내방사선 기준인 R등급(100 krad(Si))의 10배 수준으로 다양한 분야에 적용이 가능한 수준의 내방사화 기술이다.

원전 내 사용되는 센서들에 공통적으로 적용할 수 있는 COTS 소자로 설계된 신호처리모듈의 신호처리방법 및 구성은 그림 1과 같다. 신호처리모듈은 정전용량과 저항 값을 입력으로 하는 PWM 방식의 센서 신호처리방법을 기반으로 PWM 신호의 펄스폭을 가변시키기 위한 타이머회로와 변조된 PWM 신호를 듀티 비(Duty ratio)에 비례하는 전류신호로 변환하기 위한 피크홀드(Peak-hold) 회로를 포함한 전압-전류 변환회로로 구성된다. 또한 고준위 방사선 환경요건을 충족시키기 위하여 바이폴라 기반의 트랜지스터 및 수동 소자(Passive element)를 이용하여 설계하였다.

2.1.3 PWM 방식의 신호처리회로

센서 신호처리를 위한 공통회로의 PWM 변조회로는 그림 2와 같이 저항과 정전용량의 값에 따라 변화되는 충전·방전 시정수 τ 의 변화를 기준 클럭에 따라 생성되는 PWM 신호의 펄스

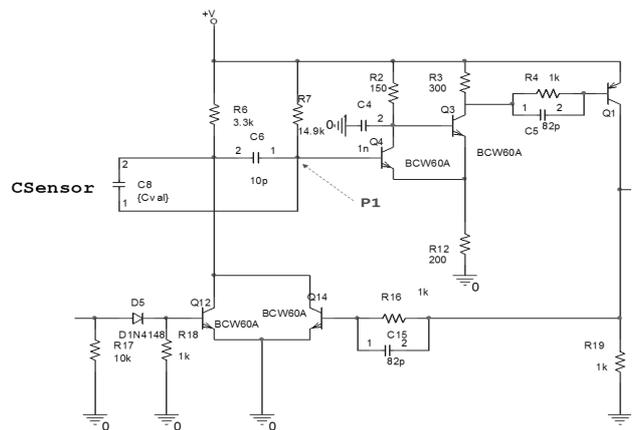


그림 2 PWM 방식의 센서 신호처리회로
 Fig. 2 Schematic of sensor signal processing circuits using PWM methods

스폭을 가변시킬 수 있도록 구현하였다. 여기서 정전용량 값을 고정하는 경우 저항 값에 비례한 PWM 변조신호를 얻게 되고, 이와 반대로 저항 값을 고정하는 경우 정전용량 값의 변화에 따른 PWM 변조신호를 출력하는 형태로 나타난다.

PWM 방식의 신호처리회로는 앞서 설명한 그림 1의 구성과 같이 바이폴라 기반 트랜지스터로 설계된 펄스폭 가변용 타이머 회로와 변조된 PWM 신호를 듀티 비에 따라서 전류신호로 변환하기 위한 전압-전류 변환회로로 구성된다.

PWM의 펄스폭을 가변시키기 위한 회로의 동작은 그림 3의 충전/방전 시정수 τ 에 따른 PWM 변조과정에서 나타난다. 초기상태를 기준으로 기준 클럭의 입력에 따라 PWM 변조회로의 Q12의 베이스 단에 입력되는 기준 클럭의 상승에 의해 트리거 되어 Q12가 오프상태에서 턴 온 상태로 변화되고 이에 따라 C8에 충전되어 있던 전하는 Q12를 통하여 순간적으로 방전되며 이후 R7을 통하여 재충전 되는 과정을 통하여 이전의 전위로 복귀된다. 결국 Q4 베이스단의 전위

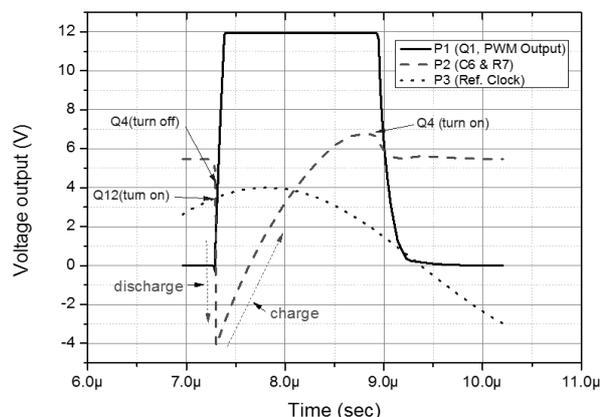


그림 3 시정수 변화에 따른 PWM 신호 변조와 센서의 정전용량 값에 따른 PWM 출력신호

Fig. 3 PWM modulation signal by variation of time constant and the PWM output signal by the sensor capacitance

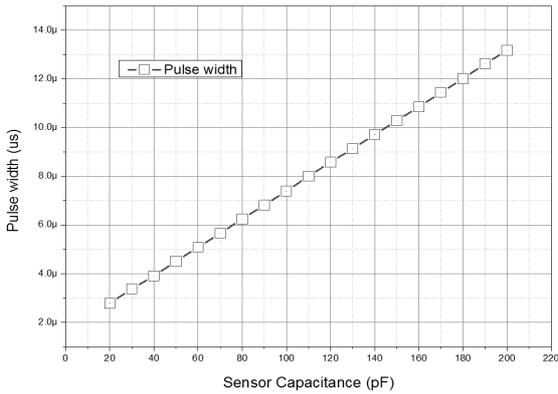


그림 4 정전용량 값에 따른 PWM 신호의 펄스폭 변화
 Fig. 4 Pulse width variation of the PWM signal by the capacitance

P1은 R7과 C8에 의하여 결정된 시정수 τ 에 의하여 Q4의 턴오프 시점을 변화시키게 되며 최종적으로 Q1을 통하여 출력되는 PWM 신호의 듀티 비를 결정하게 된다. 그림 4는 센서의 정전용량 값의 변화에 따른 PWM 출력신호의 펄스폭 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

2.1.4 공통설계회로 기능분석

제안된 PWM 방식으로 설계된 공통회로의 주요 동작특성을 확인하기 위하여 pSPICE 시뮬레이션을 이용하여 두 가지 측정(입력) 값, 즉 정전용량과 저항 값의 변동에 따라 변환되는 전류신호(출력)의 특성을 분석하였다. 정전용량형 센서의 정전용량 크기 변화범위는 약 20 ~ 200 pF, 펄스폭의 변화범위는 약 3 ~ 13 μ s로 설정하였고, PWM의 가변 주기에 대한 민감도를 최대한 반영하기 위하여 PWM의 듀티 사이클을 결정하기 위한 기준 클럭 생성부의 발진 주파수는 160 kHz로 결정하였다.

정전용량 값에 따라 변화되는 PWM 출력의 듀티 비와

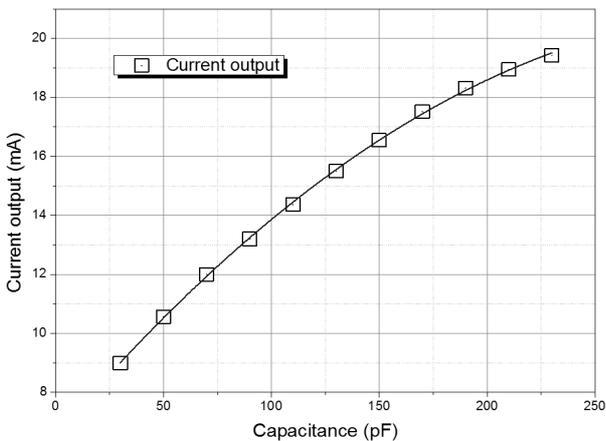


그림 5 센서 신호처리 회로의 정전용량 값에 따른 전류 출력의 변화
 Fig. 5 Output current variation of the sensor signal processing circuit by the capacitance

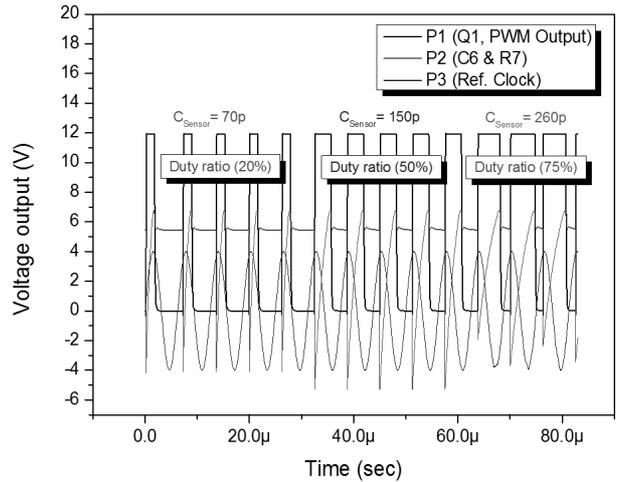


그림 6 센서의 정전용량 값에 따른 PWM 출력신호 변화
 Fig. 6 Variation of the PWM signal output by the sensor capacitance

최종 전류출력의 변화는 그림 4의 시뮬레이션 분석 결과와 같이 센서의 정전용량 값의 변화에 대한 PWM 신호의 펄스폭의 변화는 선형적인 특성을 나타내며, 변화된 PWM 신호의 듀티 비는 그림 5와 같이 지수적 비례 특성을 갖는 최종 전류 값으로 정상적으로 변환된다.

또한 그림 6은 센서의 정전용량 값에 연동된 PWM 파형의 듀티 비의 변화에 따라 출력되는 최종 전류신호의 변화 특성의 시뮬레이션 그래프이며 설계한 센서 공통회로 모듈의 입출력 특성을 보여준다.

3. 내방사선 평가시험 및 분석

본 연구에서 설계 제작한 센서 공통회로 모듈에 대한 총이온화선량(TID) 평가시험은 누적 방사선량에 따른 전기적 특성 변화를 실측 평가하는 과정이며 균일한 선량률 조건으로 Co^{60} 방사선장에서 수행되었다. 방사선 시험절차 및 방법은 국외의 대표적인 방사선시험 관련 절차서로 인정받고 있는 미 국방성의 MIL-STD-883H 1019.8[10] 및 MIL-STD-750H 1019.5[11]를 준용하여 진행하였다.

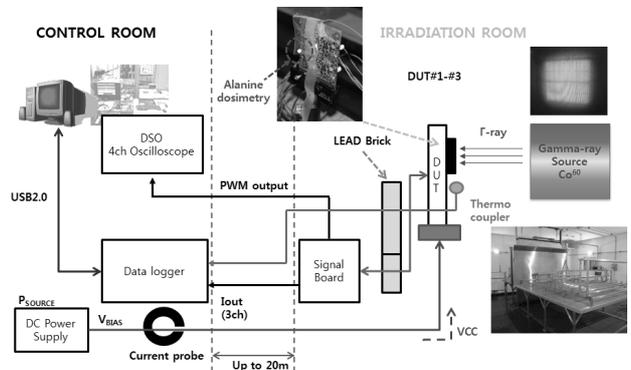


그림 7 실측평가 시스템 구성
 Fig. 7 Experimental Set-up

3.1 공통설계회로 기능분석

공통회로에 대한 내방사선 평가시험은 그림 7과 같이 제작된 3개의 시료를 이용하여 정읍 방사선과학연구소의 고준위 감마선 Co^{60} 방사선원을 이용하여 총 누적선량 약 12 kGy을 기준으로 조사 중(In-Situ) 조건에서 각 시료별 전류 출력의 변화와 PWM 파형, 그리고 신호의 펄스폭 및 듀티비의 변화를 실시간으로 측정했다.

3.2 센서 공통회로의 내방사선 특성분석

센서 공통회로를 대상으로 총 누적선량 12 kGy에 대한 방사선 조사시험 결과 누적선량에 따른 출력전류의 변화의 경우 그림 8과 같이 Full-Scale 대비 최대 약 -7% 범위의 변화를 보였다. 이러한 변화현상은 총 누적선량 2 kGy 도달 시점까지 누적선량 증가에 따른 출력전류 감소현상을 보인 후 2 kGy 이후 점진적으로 상승하는 경향을 나타내었다.

이러한 변화현상은 그림 9의 누적선량에 따른 PWM 출력신호의 듀티 비와 주기에 대한 측정결과에서 최종 전류출

력의 변화와 유사한 기울기의 변화를 나타내는 것으로 확인되었다.

실측결과에서 보여준 전류출력 신호의 변화 현상은 앞서 설명한 바와 같이 각각의 변화 현상으로 인하여 트리거 시점을 감소 또는 증가시키는 원인으로 작용함에 따라 0 ~ 2 kGy 구간에서는 npn트랜지스터의 베이스단의 절연층 계면에 포획된 정공에 의한 Q4의 V_{BE} 의 감소현상으로 인하여 듀티 비가 감소되는 형태를 보여주었다. 누적선량 2 kGy 이상인 시점으로부터 포획된 정공의 수가 지속적으로 증가함에 따라 V_{BE} 의 감소현상과 동시에 누설전류의 발생을 증가시켰고, V_{BE} 에 의한 감소요인 보다 상대적으로 더 크게 영향을 받아서 2 kGy 이하에서 보여준 전류출력의 감소현상과는 반대로 누설전류가 증가하여 듀티 비가 점진적으로 상승하는 결과를 보였다.

그림 10, 11은 기존의 PWM 회로의 Q3, Q4의 베이스와 에미터간 누설전류 모델을 추가한 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과를 통하여 방사선 조사에 의한 PWM 회로의 누설전류의 증가요인은 펄스폭 변조회로의 듀티 비의 변화로 최종 전류출력이 영향을 받을 수 있음을 확인할 수 있다.

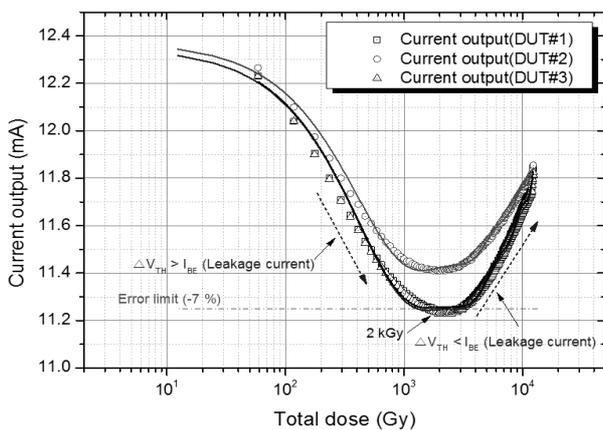


그림 8 누적선량 의한 센서 공통회로모듈의 출력전류 변화
Fig. 8 Variation of output current on common sensor circuits by total ionizing dose

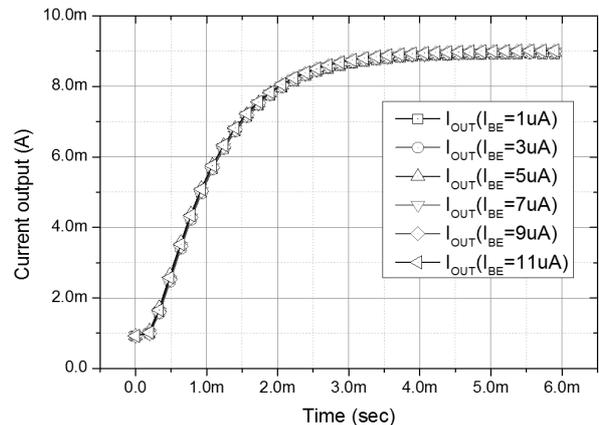


그림 10 누설전류(I_{BE}) 변화에 따른 출력전류 변화
Fig. 10 Variation of output current by leakage current (I_{BE}) of PWM circuits

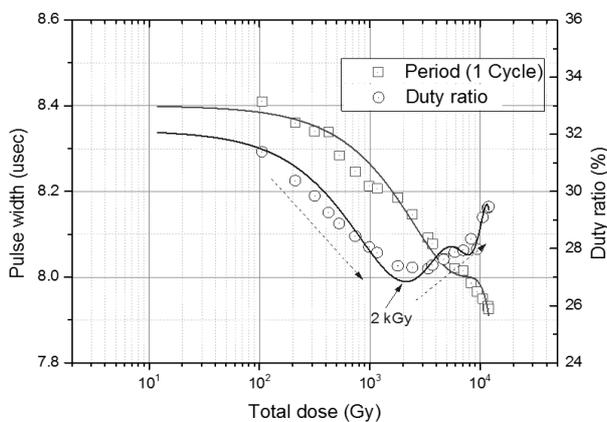


그림 9 누적선량에 따른 PWM 회로의 펄스폭변화 특성
Fig. 9 Characteristics of the pulse width variation on the PWM circuits by total ionizing dose

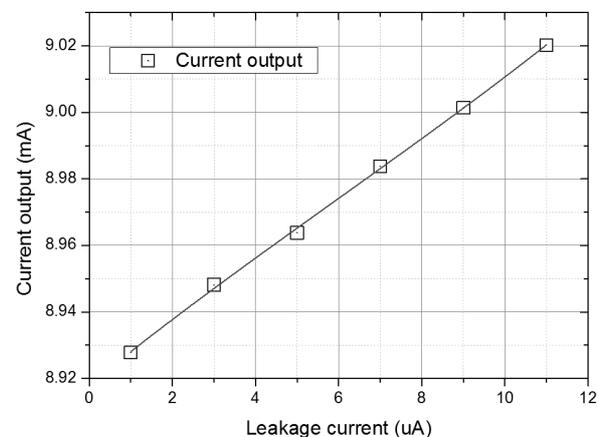


그림 11 누설전류(I_{BE}) 변화에 따른 출력전류의 변화
Fig. 11 Variation of output current by leakage current(I_{BE}) of PWM circuits

4. 결 론

본 연구에서는 원전 격납건물 내부의 고준위 방사선 환경 조건에서 원전 내 공정계측에 사용되는 다양한 센서에 적용할 수 있는 내방사선 원전센서 공통신호처리 모듈을 개발하였다. 원전 센서의 공통적인 특징인 R과 C의 변화를 입력으로 하는 PWM 변조회로를 기반으로 공통회로를 설계하였으며, 설계/제작된 신호처리모듈을 대상으로 국외의 내방사선 성능평가 절차 및 기준을 준용하여 내방사선 평가시험을 수행하였다. 실측평가를 통하여 MIL-PRF-19500P에 명시된 내방사선 등급인 RHA-H 등급을 기준으로 총 누적선량 약 12 kGy의 범위에서 Full-Scale대비 ±7 % 범위를 만족하는 결과를 확인하였다. 또한 실측결과 분석과 전기적 특성변화를 기반으로 모델링한 pSPICE 시뮬레이션 분석을 통하여 방사선에 의한 공통신호처리 모듈의 PWM 출력파형과 출력 전류의 변화현상이 펄스폭 변조회로의 듀티 비 변화가 원인으로 작용한다는 것을 확인하였다.

제안된 COTS 소자를 이용한 내방사선 회로설계 기술을 통하여 원전 내 공정계통에 적용되는 다양한 센서에 공통적으로 적용할 수 있는 내방사선 신호처리를 위한 핵심기술을 확보하게 되었으며, 다양한 분야에 적용할 수 있는 내방사선 국산 제품의 개발이 가능함에 따라 국내 원전의 안정성과 유지보수 측면에서 크게 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(원자력연구개발사업, No. 2011-0031840)의 지원을 받아 수행된 연구임

References

[1] George C. Messenger, and Milton S. Ash, The Effects of Radiation On Electronic Systems, Springer Press, May 14, 1992.
 [2] Total Dose Steady-state Irradiation Test Method, ESCC Basic Specification No. 22900, Oct. 2010.
 [3] Lewis Cohn, Al Wolicki, Mayrant Simons, Clay Rogers, and Alfred Costantine, Transient Radiation Effects on Electronics(TREE) Handbook, Defense Nuclear Agency, Dec. 1995.
 [4] Seugn-Chan Oh, Nam-Ho Lee, and Heung-Ho Lee, "The Study of Transient Radiation Effects on Commercial Electronic Devices," Trans. KIEE, vol. 61, No. 10, pp.1448-1453, 2012.
 [5] Sang-Hun Jeong, Nam-Ho Lee, Min-Su Lee, and Seong-Ik Cho, "A Study of CMOS Device Latch-up Model with Transient Radiation," Trans. KIEE, vol. 61, No. 3, pp.422-426, 2012.
 [6] IEEE Qualification Report D2010015 Revision A: Rosemount 3152N Pressure Transmitters, Rosemount Nuclear Instruments, 2010.

[7] H. M. Hashemian, Maintenance of Process Instrumentation in Nuclear Power Plants, Springer Press, 2006.
 [8] H. S. Andrew, and Len Adams, Handbook of Radiation Effects, Oxford New York Tokyo, Oxford University Press, 1993.
 [9] General Specification for Semiconductor Devices, U. S. Department of Defense(DoD), MIL-PRF-19500P, Oct. 2010.
 [10] Ionizing Radiation(Total Dose) Test Procedure, U. S. Department of Defense(DoD), MIL-STD-883H 1019.8, Feb. 28. 2010.
 [11] Test method standard for semiconductor devices, U. S. Department of Defense(DoD), MIL-STD-750E, 2006.

저 자 소 개



김 종 열 (金 鍾 烈)

2009년 한양대학교 전자전기공학부 학사
 2011년 한양대학교 전기공학과 석사
 2011년~현재 한국원자력연구원 원자력 융합기술개발부 연구원



이 남 호 (李 南 昊)

1991년 경북대학교 전자공학과 학사
 1993년 경북대학교 전자공학과 석사
 2004년 충남대학교 전기공학과 박사
 1992년~현재 한국원자력연구원 원자력 융합기술개발부 책임연구원
 2009년~현재 충남대학교 전자전기공학부 겸임교수



정 현 규 (鄭 炫 圭)

1981년 서울대학교 금속공학과 학사
 1987년 서울대학교 금속공학과 석사
 2000년 한국과학기술원 재료공학과 박사
 1983년~현재 한국원자력연구원 원자력 융합기술개발부 책임연구원



오 승 찬 (吳 承 燦)

2000년 건양대학교 컴퓨터공학과 학사
 2002년 건양대학교 컴퓨터공학과 석사
 2013년 충남대학교 전기공학과 박사
 2008년~2014년 한국원자력연구원 원자력 융합기술개발부 연구원
 2014년~현재 (주)신우이앤디 수석연구원