

## 내방사선 원전센서 공통 신호처리 모듈 설계

이남호<sup>1</sup> · 황영관<sup>1</sup> · 김종열<sup>1</sup> · 이승민<sup>2\*</sup>

### A design of radiation hardened common signal processing module for sensors in NPP

Nam-ho Lee<sup>1</sup> · Young-gwan Hwang<sup>1</sup> · Jong-yeol Kim<sup>1</sup> · Seung-min Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 305-353, Korea

<sup>2</sup>Department of Electric, Electronic & Communication Engineering Education College, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

#### 요 약

본 연구에서는 정상 운전이나 사고 시 발생하는 고방사선 환경에서 다양한 센서에 공통적으로 사용할 수 있는 내방사선 센서 신호처리 모듈을 설계하였다. 개발한 초기 모듈은 센서의 저항(R)과 정전용량(C) 값의 변화를 입력으로 받아 PWM 신호 변조방식으로 처리하도록 설계되었다. 이 모듈은 총 약 12 kGy 방사선 평가시험에서 Full-Scale 대비  $\pm 10\%$  오차범위를 가지고 있었다. 오차 발생의 주요 원인은 방사선 피폭량의 증가에 따른 공통회로 내 스위칭 소자의 열화와 이로 인한 펄스폭 변조회로의 듀티 비 증가로 분석되었다. 이 분석결과를 반영한 방사선 내성강화를 위해 방사선에 의한 특성변화를 상쇄하는 회로를 추가하여 재설계하였고, 20.7 kGy 범위의 TID 시험에서 Full-scale 대비 5% 이하 오차로 개선결과를 얻었다.

#### ABSTRACT

In this study we designed the radiation-hardened sensor signal processing modules that can be commonly used for a variety of sensors during normal operation and even in high-radiation environments caused by an accident. First development module was designed to receive the change of the R and C value from the sensors and to process the signal as a PWM modulation scheme. This module was assessed to have  $\pm 10\%$  error to the Full-Scale in the radiation test in the range of 12 kGy TID. The main cause of the error was analyzed as the annealing of the common circuit in the switching element and the consequent increase in the duty ratio of the pulse width modulation circuit according to the radiation dose increasement. The redesigned module for higher radiation resistivity with Stub transistor circuit was found to have less than 5% error to the Full-scale from the radiation test results for 20.7 kGy TID range.

**키워드** : 내방사선 센서회로, 방사선 실험, 공통회로, 총이온화선량

**Key word** : Radiation hardening Sensor circuit, Radiation test, Nuclear power plant, Total Ionization Dose

Received 30 April 2015, Revised 22 May 2015, Accepted 08 June 2015

\* Corresponding Author Seung-Min Lee(E-mail:zbus@cnu.ac.kr, Tel:+82-42-821-8578)

Department of Electric, Electronic & Communication Engineering Education College, Daehan University, Daejeon 654-321, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.6.1405>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

요르단 원자로 수출과 제 2 원자력 르네상스 시대를 맞아 정부에서 강력하게 추진하는 원자력기술 선진국으로의 기반을 더욱 공고히 하기 위해서는 안전계측 센서기술과 원전설계사고기준-제 미국 국방부와 에너지 관리부에서는 원전사고의 잠재적 원인을 전자소자에 대한 피해일 가능성으로 보아 내방사선 전문가를 통해 위험도 분석을 위한 원전 현장 자료조사를 착수한 사례도 있다[1].

현재 국내에서 개발하고 있는 원전용 센서 및 신호처리회로는 방사선에 취약하여 고방사선 구역인 Harsh-zone에는 내방사화 설계된 국외제품만 적용 및 설치가 가능한 상태이다.

국내 원전기술의 완전 자립과 미연의 사고를 고려한 원전의 안전성 확보를 위해 센서회로의 내방사선화 관련 국내기술 개발 필요성은 원전 산업계와 연구계에서 오래전부터 공감해 오고 있는 상태이다. 그러나 다양한 종류의 원전 센서회로를 독립적으로 내방사화하기 위해서는 큰 비용과 기간이 소요될 것으로 예상된다. 따라서 현실적으로 단기간에 내방사선화 개발 목표를 달성하는 방안이 효율적이다[2-6].

만일 원전 내 운용되는 다양한 센서의 특성을 분석하여 공통적으로 적용 가능한 센서회로를 설계한 다음, 이 공통회로를 내방사화하여 개발하게 되면 시간과 경비를 줄일 수 있을 것이다.

본 연구에서는 원전 고준위 방사선 환경용 센서 및 전자회로의 내방사선화를 위해 먼저 원전 현장의 센서 설치 및 운용상황 분석을 통해서 다양한 센서에 공통으로 적용할 수 있는 공통 신호처리회로를 설계하고, 다음 단계로 공통회로를 내방사화함으로써 원전 센서회로의 내방사화 목표를 달성하고자 시도하였다.

즉, 다양한 원전 안전계측 센서에 공통 적용 가능한 PWM 방식의 센서 공통 신호처리 모듈을 설계하고, 제작된 모듈의 방사선 조사시험을 통해 방사선에 의한 기능 변화특성을 분석한 다음, 방사선 영향을 보상할 수 있는 회로를 추가함으로써 내방사선 성능을 증진시켰다.

## II. 원전 센서 공통 신호처리회로 설계

### 2.1. 센서 공통회로 설계 및 구현

원자로 구역에 설치되어 압력, 온도, 수위, 유량 정보를 계측하는 센서를 측정방식으로 구분할 경우 측정하고자 하는 물리적 변수량을 센서의 정전용량(C) 변화량과 저항값(R) 측정으로 크게 나눌 수 있다.

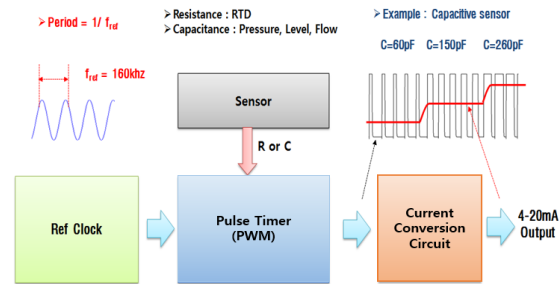


그림 1. 공통센서 신호처리회로 구성  
Fig. 1 Configuration of the common sensor signal processing circuit

제안된 센서 신호처리용 공통회로는 그림 1에 나타난 것과 같이 센서로 부터 출력되는 저항과 정전용량 값의 크기에 따른 충·방전 시정수  $\tau$ 를 가지고 기준 클럭으로부터 펄스폭을 가변시키는 PWM (Pulse Width Modulation) 방식으로 설계되었다. 여기서 정전용량 값을 고정하는 경우 저항 값에 비례한 PWM 변조신호를 얻게되고, 이와 반대로 저항 값을 고정하는 경우 정전용량 값의 변화에 따른 PWM 변조신호를 출력하게 된다. 그림 2의 공통회로는 PWM 신호의 펄스폭 가변용 타이머 회로와 변조된 PWM 신호를 듀티 비 (Duty ratio)에 비례하는 전류신호로 변환하기 위한 피크홀드 (Peak-hold) 회로를 포함한 전압-전류 변환기능으로 그림 설계하여 구현한 것이다.

공통회로에서 센서의 전기적 변화를 4 ~ 20 mA의 전류출력 신호로 변환하는 과정은, 먼저 기준 클럭 생성부로부터 출력되는 클럭신호의 상승에지를 기준으로 PWM 신호의 듀티 사이클 (Duty cycle)이 결정되고 PWM 신호의 듀티 비는 적용 센서에 따라 R 또는 C 값의 변화로 인한 충·방전 시정수  $\tau$  값에 비례하여 듀티 사이클 범위 내에서 변화량이 결정된다. 이 PWM 변조회로를 통하여 생성된 PWM 변조신호는 피크홀드 회로

로 구성된 DC 변환부를 거쳐 전압-전류 변환회로의 전류변환을 위한 DC 제어 입력으로 전달되고, 최종적으로 전압-전류 변환회로를 통하여 입력된 DC 전압의 레벨에 비례한 4 ~ 20 mA 범위의 전류 출력신호를 발생 시키게 된다.

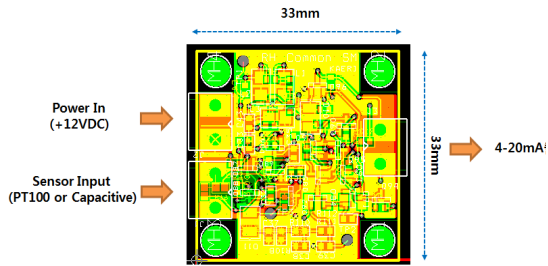


그림 2. 공통센서 신호처리모듈의 PCB 레이아웃  
Fig. 2 PCB layout of the common signal processing module

### 2.2. 센서 공통회로의 방사선 특성분석

제작된 센서 공통회로에 대한 총 이온화선량 (Total Ionization Dose, TID) 평가시험은 방사선 누적 피폭량에 따른 전기적 특성 변화를 실측 평가하는 과정으로 균일한 선량률 조건으로 정음 방사선과학연구소의 <sup>60</sup>Co 고준위 감마선 조사시설에서 수행되었다. 방사선 시험절차 및 방법은 대표적인 방사선시험 관련 절차서로 인정받고 있는 미 국방성은 총 누적선량 12 kGy을 기준으로 조사 중 (In-Situ) 조건에서 각 시료별 전류출력의 변화와 PWM 파형, 그리고 신호의 펄스폭 및 듀티 비의 변화를 실시간 계측하는 과정이었다[7].

센서 공통회로를 대상으로 총 누적선량 11.9 kGy에 대한 방사선 조사시험 결과 누적선량에 따른 출력전류의 변화는 그림 3의 시험결과 그래프에 나타난 바와 같이 Full-Scale 대비 최대 약 10% 범위의 증가형태를 보여주고 있다. 그래프에서 누적선량에 따른 출력전류의 변화는 총 누적선량이 2 kGy 도달 시점까지 누적선량 증가에 따른 출력전류 증가현상을 보인 다음 2 kGy 이후 점진적으로 감소하는 경향이 나타났다.

실험결과에 나타난 방사선 피폭에 의한 공통회로 출력특성 변화 현상의 원인은 공통회로 모듈이 감마 방사선에 누적 피폭되는 과정에서 기준 클럭 생성용 발진회로와 PWM 변조회로를 구성하는 npn 트랜지스터에 미친 TID 영향에 기인한 것으로 예상할 수 있다.

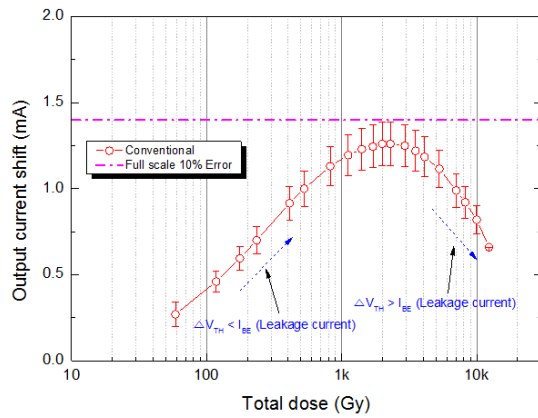


그림 3. 누적선량에 따른 공통회로 전류출력의 변화  
Fig. 3 A current output transition of a common circuit to the accumulation dose

즉 이온화 방사선 피폭에 의해 공통모듈의 회로를 구성하는 단위 전자소자에서 특성변화가 발생하였고, 그 결과 나타난 소자의 문턱전압 (VBE)의 감소, 베이스와 에미터 간 누설전류 (IBE)의 증가가 직접적 원인으로 판단된다. 또, 2 kGy 이상인 구간에서의 출력전류 감소 현상은 펄스폭 조절회로의 트랜지스터 턴온(Turn-on) 시점 상승에 의해 발생하였고, 이 현상은 이전에 나타난 두 가지 감쇄요인 보다 상대적으로 더 크게 작용함으로 2 kGy 이하에서 보여준 전류출력의 증가 현상과는 반대로 누설전류의 감소에 따라 듀티 비가 점진적으로 상승하는 방향으로 진행된 것으로 판단된다. 결국 회로 내 특정 전자소자에서의 누적방사선 영향이 전류출력 증감의 원인을 제공한 것이다[8,9].

### III. 센서 공통회로의 내방사화

설계한 원전 센서용 공통회로는 방사선 피폭에 의해 누적선량 2kGy 지점에서 출력전류의 이상현상 발생을 확인하였고, 10kGy급 내방사화 특성을 갖기 위해서는 내방사화 기술의 적용이 필요함을 확인한 상태였다.

가장 단순한 내방사화 기법은 대상 전자회로에서 방사선에 취약한 단위 전자소자를 내방사선 소자 (RadHard device™)나 선별(Screening) 방식을 통해 구한 방사선 내성이 높은 소자로 대체하는 것이지만, 소자의 수급과 비용면에서 한계를 가지고 있다.

본 연구에서는 방사선 피폭에 의한 트랜스미터 회로의 내방사선 성능저하 문제를 해결하는 새로운 방법으로 트랜지스터의 방사선 조사에 따른 전기적 특성변화를 최소화하는 방안을 연구하였다. 이 방법은 방사선 영향으로 인한 출력전류의 변화를 저감시키는 보상회로(Stub 회로)를 추가함으로써 기존 전자소자의 대체없이 내방사선 준위를 향상시키는 기법으로 COTS(Commercial off the shelf)를 이용하는 전자장비 내방사화에 큰 장점을 지니고 있다.

보상회로를 추가함으로써 방사선 피폭증가에 따라 증가되는 누설전류 감소와 이로 인한 출력전압의 상승을 역으로 보상함으로써 방사선에 의한 영향을 저감시키는 효과를 얻을 수 있도록 한 것이다[8].

설계된 회로를 제작한 소형(30mm x 30mm)는 케이스와 함께 그림 5와 같은 형태를 가진다.

#### IV. 내방사선 특성평가 및 분석

##### 4.1. 내방사선 특성평가 시험

방사선 손상 신호 보상회로를 적용한 원전 센서 내방사선 공통회로의 내방사선 특성분석을 위해 방사선 조사시험을 수행하였다. 앞서의 시험과 동일한 <sup>60</sup>Co 고준위 감마선 방사선장에서 수행한 실측평가 시험은 개별 소자의 누적선량에 의한 전기적 특성변화 측정과 내방사선 설계기술을 적용한 회로의 특성을 평가를 위해 진행되었으며, 시험소자의 전기적 바이어스 및 입·출력 조건과 소자의 전기적 특성변화를 측정하기 위해 제작한 실시간 계측 시스템을 통해 수행하였다.

특히, 내방사선 기법을 적용한 트랜스미터 회로에 대한 내방사선 실측평가 시험은 기존 회로구성과 보상회로를 적용한 회로의 내방사선 성능을 비교하기 위하여 3가지 형태의 회로를 동시에 적용하는 방식을 채택하였다. 즉, DUT-1은 기존 센서회로, DUT-2는 PWM 발진회로에만 보상회로를 적용한 것, 그리고 DUT-3는 최종 출력단 트랜지스터 구동회로 및 PWM 발진회로 양쪽에 보상회로를 모두 적용한 것이다.

##### 4.2. 방사선 특성분석 결과

총 누적선량 20.7 kGy 조건에서 내방사선 성능개선을 위한 보상회로 적용 유무에 대한 실측평가 시험결과는 그림 6에 나타나 있다. 맨 위의 그래프는 보상회로 적용 전 회로에 대한 TID 시험결과를 나타내며, 가운데는 보상회로를 PWM 발진회로에만 적용한 것, 그리고 가장 아래는 양쪽에 보상회로를 적용한 회로의 시험결과이다. 보상회로의 적용에 따라 출력전류의 변화율이 상대적으로 감소되는 결과를 확인 할 수 있었으며, 특히 보상회로를 PWM 변환 회로단과 최종 출력단에 모두 적용한 회로의 경우 20.7 kGy 누적선량 조건에서 전 구간을 통해 약 5% 이내로 오차가 제한되는 결과를 얻음으로서,

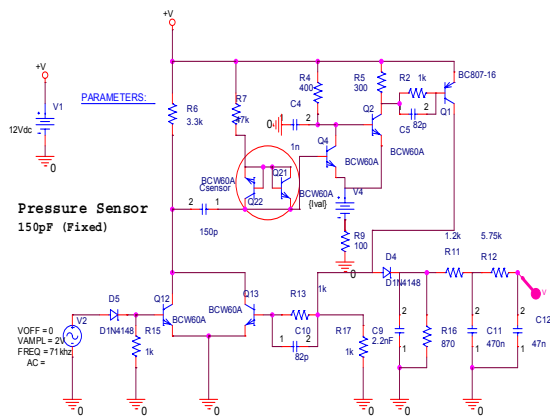


그림 4. 내방사선 성능개선을 위한 VBE 보상회로  
Fig. 4 Compensation circuit for the improvement of a rad-hardening feature

공통회로에 추가하여 설계한 보상회로는 그림 4의 원(Circle)형 부분에 해당하며 트랜지스트(Q<sub>4</sub>)의 베이스 입력단에 Stub 변조회로 트랜지스터를 추가하는 형태로서 방사선 영향에 따라 변화되는 문턱전압의 감소 특성을 보완 기능을 수행하도록 구현하였다.

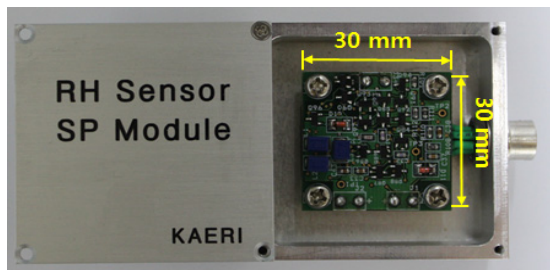


그림 5. 내방사선 센서 공통회로 모듈 원형  
Fig. 5 Rad-hardening sensor common module

출력 전류의 변화폭이 당초에 비해 2 배 이상으로 감소된 결과를 얻게 되었다.

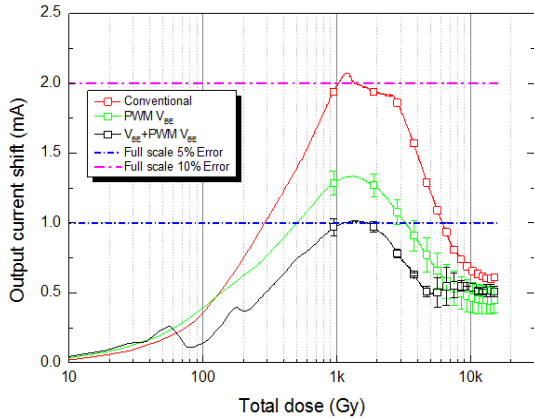


그림 6. 보상회로 성능분석용 내방사선 평가시험 결과  
**Fig. 6** Radiation test results for a performance analysis of the compensation circuit

### V. 결론

본 연구에서는 원전 원자로 구역 고준위 방사선 환경에서 공정 계측에 사용되는 다양한 센서에 적용할 수 있는 내방사선 원전센서 공통 신호처리 모듈을 설계하였다. 방사선 내성을 가진 트랜지스터로 구성된 소형의 모듈은 원전 센서의 공통적인 특징인 R과 C의 변화를 입력으로 받아 PWM 변조방식으로 정밀한 신호처리가 가능하여 다양한 공정 계측센서에 적용이 용이한 것이 특징이다.

설계 제작된 모듈을 대상으로 국외의 내방사선 성능 평가 절차 및 기준을 준용하여 내방사선 평가시험을 수행하였으며, 총 누적선량 약 12 kGy의 범위에서 Full-Scale 대비 ±10 % 오차범위를 결과를 얻었다. 이 오차는 누적 방사선에 증가에 따른 공통회로 내 스위칭 소자의 누적선량 증가와 이에 따른 펄스폭 변조회로의 듀티비 증가가 주된 원인으로 분석되었다.

고방사선 환경에서의 안정적 사용으로 사용이 가능한 공통회로 구현을 위해 방사선에 의한 특성변화를 상쇄할 수 있는 기능을 Stub 트랜지스터를 추가한 모델을 소형(30 mm×30 mm)으로 설계하였다. 내방사선 공통회로 모듈의 내방사선 시험결과는 TID 20.7 kGy 조사

시험에서 Full-scale 대비 5% 이하의 오차율의 개선된 결과를 얻었다.

본 연구를 통해 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 분야(압력/온도/수위 센서 등)에 적용할 수 있는 내방사선 국산 제품의 개발이 가능함에 따라 국내 원전의 안정성과 유지보수 측면에서 크게 기여할 것으로 기대된다.

### ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Civil Military Technology Cooperation Center.

### REFERENCES

- [1] Holmes-Siedles, Radiation-induced ionization effects in solids : a review of research problem, *Proceeding of the IEEE*, 62, 1196-1207, 1974)
- [2] S.M, Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley, New York, 1981.
- [3] Messenger, A., *The effects of radiation on electronic systems*, New York, Van Norstrand Reinhold Company, 1986.
- [4] Ricketts, *Fundamentals of Nuclear Hardening of Electronic Equipment*, Florida.: Robert E. Krieger Publishing Company, 1986.
- [5] Dressendorfer, M., *Ionizing radiation effects in mos devices and circuits*, New York, John Wiley & Sons, 1989.
- [6] George C. Messenger, Milton S. Ash, *The Effects of Radiation on Electronics System*, 1992.
- [7] Department of Defense, *Test method standard microcircuit(MIL-STD-883G)*, 2006.
- [8] Andrew, L., *Handbook of radiation effects*, New York.: Oxford University Press, 1993.
- [9] Raymond, J.P., "Generalized Model Analysis of Ionizing Radiation Effects in Semiconductor Devices," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, NS-12, pp. 55., 1965.



**이남호(Nam-Ho Lee)**

1991년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업,  
1993년 경북대학교 전자공학과 석사 졸업,  
2004년 충남대학교 전기공학과 박사 졸업,  
현재 : 한국원자력연구원 융합기술개발부 책임연구원  
※관심분야 : 방사선 센서, 입체영상, 원격제어 시스템



**황영관(Young-Gwan Hwang)**

2006년 수원대학교 전자공학과 학사 졸업,  
2008년 수원대학교 전자공학과 석사 졸업,  
2014년 충남대학교 정보통신공학과 박사 졸업,  
현재 : 한국원자력연구원 융합기술개발부 연구원  
※관심분야 : 방사선 센서, 영상처리, 방사선 카메라



**김종열(Jong-Yeol Kim)**

2009년 한양대학교 전자전기공학부 학사 졸업,  
2011년 한양대학교 전기공학과 석사 졸업,  
현재 : 한국원자력연구원 원자력융합기술개발부 연구원  
※관심분야 : 내방사선 광섬유, 광섬유 센서, 방사선 센서



**이승민(Seung-Mim Lee)**

2000년 충남대학교 전기공학과 학사 졸업  
2002년 충남대학교 전기공학과 석사 졸업  
2007년 충남대학교 전기공학과 박사 졸업  
충남대학교 전기전자통신공학교육과 초빙교수  
※관심분야 : 신재생에너지, 디지털 신호처리