

2003 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

RF형 전자적 선량계 구현

Development of a RF-type Electronic Dosimeter

이남호, 김승호
한국원자력연구소
김양모
충남대학교

초 록

본 논문에서는 RF형 비접촉식 방사선량 측정장치의 설계 및 제작에 관하여 살펴보았다. 가동중 원자로 구역에 설치된 선량계 모듈로부터 방사선량을 측정함에 있어 RF형 통신을 적용하여 비접촉 측정하는 장치를 구현함으로써 측정의 효율성과 작업자의 안전성을 높이고자 하였다. RF형 방사선선량 장치의 개발에 있어 필요한 일련의 사항들에 대한 중요한 사항을 검토한 후 이를 토대로 선량모듈과 리더모듈로 구성된 실시간 비접촉식 선량계 장치를 설계 제작하였다. 이어서 수행된 통신평가 실험에서 개발된 장치의 현장적용 가능성을 확인할 수 있었다.

Abstract

This paper presents design and manufacture of RF type non-contact radiation detection device. In detection of radiation using dosimetry module, which is set in the atomic reactor area in operation, non-contact detection can be achieved by using RF transmission to improve both the safety of an operator and efficiency of measurement. After investigating the essential particulars on the development of RF type radiation detection device, real-time non-contact dosimetry consisting of reader and dosimetry module is designed and manufactured. In addition, feasibility of the developed device is verified by experimentally undertaking RF transmission test.

1. 서론

최근 우리나라의 산업 발전이 가속화됨에 따라 전력의 수요가 급증하고 있다. 이에 따라 추가적인 원전의 건설이 요구되고 있으며 가동 원전의 수도 증가되고 있다. 원전은 원자로의 핵분열 방사선에서 발생하는 열에너지를 이용하여 전기를 발생시키게 되므로 원자로 내부로부터 고준위의 방사선이 방출된다. 발생된 방사능의 외부유출은 여러 단계에 걸친 안전장치에 의해 철저히 차단되고 있지만 원자로 구역에는 방사선 피폭이 상존하게 된다. 따라서 가동중 중수형 원자로 구역 내에 위치한 주요기기는 고준위 방사선의 피폭에 계속 노출되어 방사선에 의한 손상 가능성이 상존하고 있다. 그러므로 이들에 대한 방사선 피폭 상태를 관측함으로써 원전의 안전성을 증대시키는 것이 바람직하다.

이와 관련하여 최근 캐나다에서는 중수형 원전의 원자로 주변 기기에 대하여 원전 수명기간

(40년) 동안 피폭되는 누적 방사선량을 측정하기 위한 실험이 시도되었다. Gary Mackay^[1] 등에 의해 수행된 이 실험에는 다수의 반도체 센서를 투입하여 한 주기 운전중 원자로 주변기에서 피폭되는 감마 방사선량을 실측하고 원전 수명기간 동안의 누적 피폭방사선량을 제시함으로써 원자로 주변에 위치한 주요기기가 실제 고준위의 방사선에 노출되고 있어 고장의 위험이 존재한다는 사실을 입증하였고, 원자로로부터 원거리로 재배치할 것을 권고하고 있다.

그러나 이 논문에서 방사선 피폭량을 측정하기 위해 사용한 오프라인 방법으로 인해 방사선 조사 후 측정까지 시간 지연이 발생하는데 이로 인해 소자 내부에 기억된 방사선량 값이 줄어드는 열화현상이 발생하게 되어 축소된 측정 결과를 나타낼 가능성이 있다. 또한 수거된 소자를 직접 측정하는 과정에서 중성자에 피폭되어 방사화된 센서에서 발생하는 이차 방사선에 노출되는 위험성도 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 원자로 구역에 위치한 기기들에 실시간 방사선 선량계를 설치한 다음 현장에서 직접 피폭 방사선량을 측정하는 장치를 구현하여야 한다.

한편 한국원자력연구소 로봇랩에서는 가동중 중수형 원자로 전면부의 이상 유무를 감시하는 이동형 로봇(KAEROT/m2)를 개발한 바 있다. 고준위 방사선은 로봇제어장치 등에 치명적 영향을 미쳐 로봇의 고장이나 오동작을 유발하게 되므로, 설계 기준치 이상의 방사선 피폭을 실시간 모니터링하는 방사선선량계가 이동로봇에 구현되어 있다. 여기에 사용된 방사선 센서는 방수가 용이하고 충격에 강인한 소형의 pMOSFET 소자로 자체에 방사선 누적 기능을 갖추고 있다.

작업자의 접근이 불가능한 가동중 원전의 원자로 구역내 주요 기기들에 대한 피폭방사선량 측정에서 개발된 이동 로봇을 이용할 수 있다. 즉 원전 예비 정비기간 동안 원자로 구역내 기기들에 pMOSFET 센서를 부착하고 원전 재 기동 후 필요한 시점에 이동 로봇을 투입하여 측정 위치에서 누적 피폭된 방사선량을 측정하게 되는 것이다. pMOSFET 센서로부터 피폭 방사선량 정보를 측정하기 위해서는 비접촉 방식 정보 추출기능과 MOSFET의 모드변환 기능의 구현이 필요하다. 즉 이동 로봇이 설치된 센서와 일정 거리 이내로만 접근하여 MOSFET에 정전류를 인가한 다음 이에 대응하는 소자 출력단의 전압을 무선으로 실시간 읽어오는 장치를 구현하여야 가능하게 되는 것이다. 방사선 측정 장치에서의 통신방식은 RF-ID의 원리를 적용하여 MOSFET의 모드변환과 센서로부터 방사선량 측정 및 측정값을 실시간 전달받음으로써 작업자의 접근이 불가능한 원자로 구역에서의 방사선 분포를 측정할 수 있다.

본 논문에서는 가동중인 원전 원자로 구역에 이동 로봇을 투입하여 각 기기에 부착된 MOSFET 센서로부터 비접촉 방식으로 누적 피폭 방사선량을 측정하는 장치를 구현하고자 시도하였다. 원자로 구역내 기기에 부착될 반도체형 선량계와 태그(Tag) 모듈과, 이동 로봇에 부착될 리더(Reader) 모듈을 개발하였고 RF 통신에 필요한 기능 및 장치를 구현함에 있어 여러 가지 기술 혹은 기법에 대하여 살펴보았다. 그리고 제작된 RF 방식 선량계에 대한 통신실험을 통하여 현장적용 가능성을 확인하였다.

2. 방사선 측정 센서로서의 MOSFET

그림 1(a)와 같은 형태의 MOSFET은 스위칭 및 증폭용으로 사용되는 반도체 소자의 일종으로 소자 내 산화물층(SiO₂)으로 절연된 게이트의 인가전압에 의해 제어되는데 게이트 전압이 문턱 전압(V_T) 이상이면 작동(On)하고, 그 이하이면 정지(Off)하게 된다. 이 V_T 값은 MOSFET을 방사선 센서로서 활용하기 위한 주요변수로서, 방사선에 조사될 경우 V_T 값의 변위 현상이 나타나는데 이 변위값을 이용하여 방사선량을 측정할 수 있다.

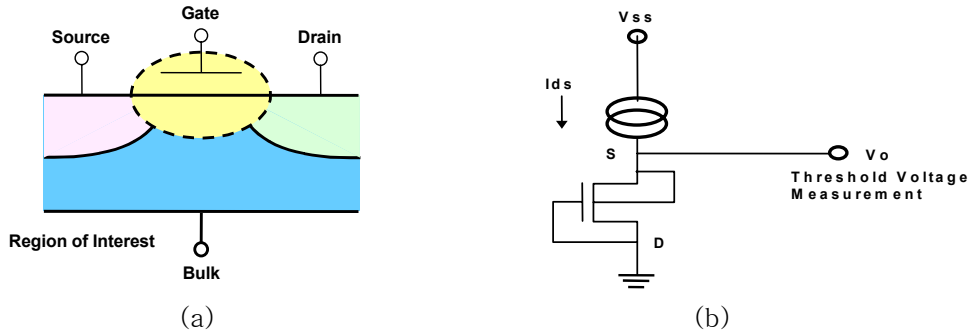


그림 1. pMOSFET의 (a)단면도, (b)회로도

여러 가지 문턱전압 값을 구하는 방법 가운데 소형의 전자회로로 구현이 유리한 정전류 인가식은 실험을 통해 결정된 낮은 고정 드레인 전류값(I_d)을 인가하고 이때의 게이트 전압을 추출하는 것으로서, 이때의 드레인 전류의 관계식은 아래 식 (1)과 같이 표현된다(그림 1(b)).

$$I_d = \mu_n \frac{W}{L} C_{ox} [(V_g - V_T) V_d - 0.5 V_d^2] \quad (1)$$

여기서 I_d 는 드레인 전류, n 은 전자의 이동도, W 는 채널의 두께, L 은 채널의 길이, C_{ox} 는 산화층의 두께, V_g 는 게이트 전압, V_T 는 문턱전압, 그리고 V_d 는 드레인 바이어스 전압이다.

pMOSFET이 방사선에 노출되면 소자의 게이트 산화물층(Oxide Layer, SiO_2) 내부에서 전자-정공쌍 (Electron-Hole Pair)이 형성된다. 전자는 빠르게 게이트 쪽으로 이동하여 게이트 전극에 수집되며, 반면 정공은 산화물층 내부의 산화물(Oxide)과 결합하여 반영구적인 양이온을 형성하게 된다. 이러한 정공 트랩(Hole Trap)과 계면트랩(Interface Trap)들은 pMOSFET에서 양의 전계로 작용하기 때문에 이 소자를 작동시키기 위해서 새로 형성된 전계 만큼 추가적 전압을 인가하여야 한다. 즉, 방사선 피폭량이 증가할수록 소자에는 높은 게이트 전압을 걸어주어야 소자를 작동시킬 수가 있기 때문에, 이 문턱전압(V_T)이 피폭 이온화 방사선량을 측정하는 변수가 된다. 그림 2는 이러한 이온화 방사선 피폭 량에 따른 pMOSFET의 V_T 변화량을 도시한 그림이다. 방사선 노출 이전의 pMOSFET의 출력특성은 제일 왼쪽 곡선이며 방사선에 노출되어 피폭 방사선량이 증가할수록 출력특성(V_G - I_D)에서의 곡선들은 오른쪽으로 이동하게 된다.

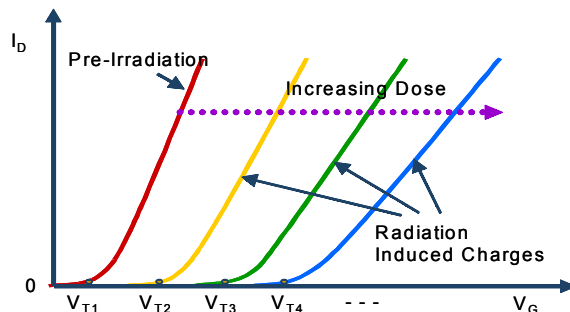


그림 2. 방사선 피폭에 따른 pMOSFET의 출력 특성변화

MOSFET형 방사선 센서는 사용분야 및 용도에 따라 방사선 대한 감도와 사용가능 총 선량 범위가 고려되어야 한다.^{[2],[3]} pMOSFET의 이온화 방사선에 대한 특성은 방사선의 에너지 및 게이트 산화층의 두께에 따라 다르며 일반적으로 산화층이 두꺼울수록 감마선에 대한 반응이 민감하게 나타난다.

3. RF(Radio Frequency IDentification) 시스템

RF-ID 시스템은 일정한 주파수 대역을 이용해 무선방식으로 각종 데이터를 주고받을 수 있는 시스템을 말하는 것으로서 최근 활발한 연구가 진행되고 있으며 여러 분야에서 광범위하게 활용되고 있다.^[4] 기존에 자기카드나 바-코드 등으로 인식하던 시스템은 시간이 경과할수록 표식 부분이 마찰과 오염 등으로 인해 인식률이 떨어지는 반면에 RF-ID는 비접촉식이므로 수명이 반영구적이다. 또한 RF-ID 시스템은 카드 쪽의 데이터를 다시 수정 할 수 있고 위변조가 불가능하며, 반영구적이라는 장점도 있다. 이외에도 RF 카드는 보안성, 높은 신뢰성, 다기능, 그리고 사용 편리성 등 기능상 여러 장점으로 인해 카드 소지자에게 편리함을 제공하고 있다.

RF-ID 시스템은 그림 3과 같이 태그(Tag)와 리더(Reader), 그리고 주 컴퓨터로 구성되어 있다. 태그는 안테나와 저 전력 집적 회로로 구성되어 있으며 리더와 통신하여 정보를 전달하게 된다. 태그의 앞부분을 리더라고 총칭하고 태그에 전원을 공급하고 정보를 읽어 들여 주 컴퓨터로 전달하는 기능을 한다. 리더와 태그는 여러 종류의 주파수 변조 방식을 통하여 데이터를 송수신할 수 있으며, 태그로 사용되는 카드에 전지가 내장된 것을 능동형(Active type) RF-ID, 전지 없이 Reader로 부터 전원을 공급받아 구동되는 것을 수동형(Passive type) RF-ID라 한다.^[5]

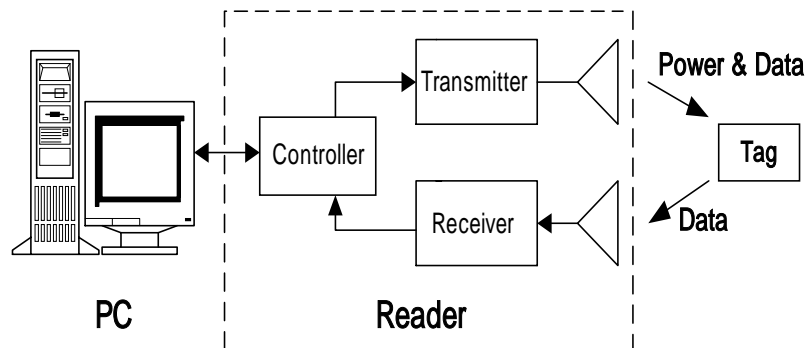


그림 3. RF-ID 시스템의 기본 구성도

4. RF형 비접촉식 선량장치 구현

RF-ID의 원리를 이용한 RF형 선량장치는 그림 4와 같이 RF 선량모듈과 RF 리더모듈로 나눌 수 있으며, RF 선량모듈은 다시 제어부, 센서데이터 취득부, EEPROM, 신호변환부, 주전원 스위칭부, LCD 출력부로 세분된다. 제어부는 모든 시퀀스의 제어를 담당하는 역할을 하고, 일련의 처리를 통하여 측정된 방사선량의 정보를 초당 2Byte 정보로 가공하여 안테나를 통하여 RF 신호로 송신한다. 이때 RF 신호 감지부, 제어부, 신호 변환부, EEPROM, 데이터 처리부, LCD 출력부로 구성되는 RF 리더모듈이 통신 범위 내에 존재할 경우 전송된 신호를 감지하여 비접촉식 데이터 통신이 이루어지게 된다. 리더모듈 내의 RF 신호감지부에서 제어부로 전달된 RF신호 감지정

보는 인터럽트를 발생시키고 신호 변환부는 연속적으로 입력되는 신호를 디지털신호를 변환하여 제어부에 전달하게 되는데, 2 바이트의 정보 중 1바이트는 12비트 A/D 변환결과인 상위 6비트가 되며, 남은 1바이트는 하위 6비트의 값을 의미한다. EEPROM에 저장된 정보는 신호의 분석에 이용된다.

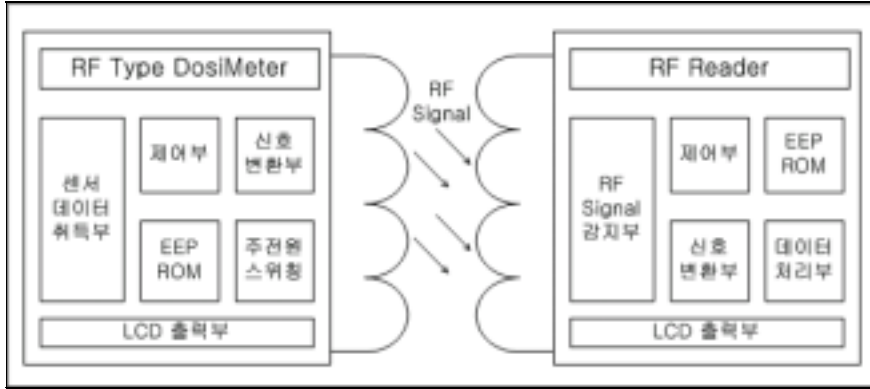


그림 4. RF형 선량장치의 구성도

4.1 RF 선량모듈

RF 선량모듈은 MOSFET에 누적 피폭된 방사선량을 실시간 디지털방식 측정을 위해 개발된 선량계에 RF통신 기능을 추가하여 구성한 것으로서 주전원 스위칭 기능이 구현된 것이 특징이다. 이 주전원의 스위칭은 선량 모듈에서 소요되는 전원의 절약과 함께 MOSFET의 두 사용모드-방사선 조사모드와 방사선 신호 측정모드-를 전환시키는 역할을 하며, 그림 5와 같이 디지털 선량부와 주전원 스위칭부, 그리고 안테나 스위칭부로 나눌 수 있다.

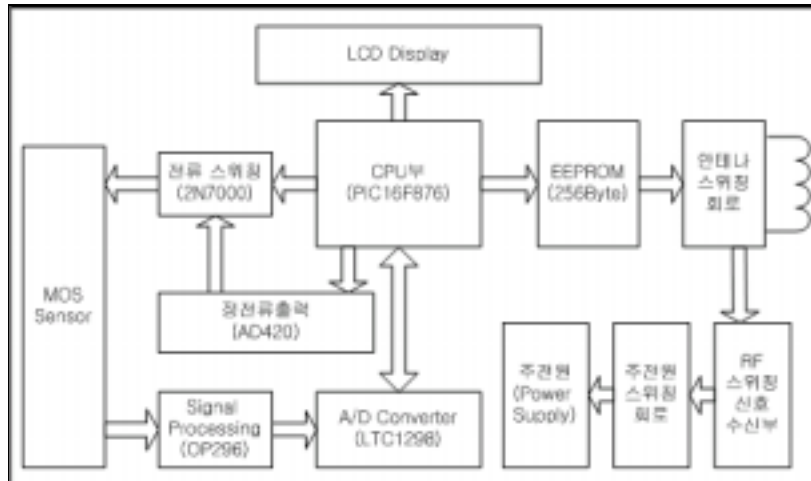


그림 5. RF형 선량모듈 기능 구성도

RF 선량모듈의 동작은 다음과 같이 이루어진다. 우선 이동 로봇에 탑재되어 있는 RF 리더모듈이 일정 거리 이내로 접근하게 되면 선량모듈 안테나 회로를 통하여 전력이 유기되고 RF 스위

칭 신호 수신부에서는 4Vp-p의 전압이 인가된다. 이 전압은 스위칭 트랜지스터의 게이트 단자로 인가되어 트랜지스터를 작동하여 소스 단자로 접속된 주전원을 회로에 공급하게 되고, 비로소 CPU가 최초 동작을 수행하면서 순차적인 동작을 수행하게 된다.

4.1.1 안테나부

안테나 부는 RF 통신을 수행함에 있어서 가장 중요하면서도 기본적인 부분이다. 안테나 부는 그림 6와 같이 L과 C1, C2, 그리고 스위치로 구성되는데, L과 C는 병렬회로로 이루어진다.

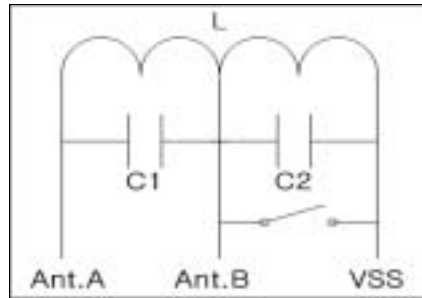


그림 6. 안테나의 구성

본 연구에서 구성된 안테나의 모양과 L, C의 값은 MicroChip사의 Application Note(Antenna Circuit Design For RFID Applications, RFID Coil Design)를 참조하였으며, 전력 전송 주파수 13.56 MHz에서 공진시키기 위해 실험적으로 산출된 최적의 L과 C값을 사용하였다. 기본적인 산출식은 아래와 같다.

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\left(\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}\right)}} \quad (2)$$

안테나 B와 VSS 사이에 사용된 스위치의 스위칭에 의해 전체 정전용량에 변화가 생기고 이로 인해 공진주파수의 값이 변한다. 이때 RF 리더모듈에는 스위칭 된 신호가 감지되어 데이터의 전달이 가능함을 알 수 있다. 설계과정에서 사용한 L과 C의 값은 초기에 수식에 의해 계산된 값과는 차이가 발생했다. 그 이유는 사용한 코일의 L 값이 높은 주파수 영역에서 변한 것과 전용 제작기를 이용하지 않고 수동으로 제작함에 따라 신뢰성을 확보하지 못한 것에 있다고 판단된다. 따라서 정확한 L의 제작이 어려운 관계로, L의 값을 일정 범위의 값으로 고정하고 C의 값을 조합하는 방법으로 안테나 회로를 튜닝하였다.

4.1.2 주전원 스위칭부

선량 모듈은 설치 후 교체 및 보수를 위한 작업자의 접근이 어려우므로 가능한 전지 전원소모를 최소화하여 동작하도록 함으로써 모듈의 작동시간을 가능한 연장하여야 한다. 이를 위해 RF 리더모듈이 접근할 때만 전원을 인가하도록 스위칭하는 기능을 추가하였다. 이 기능에 의해, 방사

선에 조사되는 상태에서 주전원이 차단된 RF형 선량모듈에 RF 리더모듈이 근접하면 코일에 교류 전압(50V 정도)이 유기되고, 이 유기전압의 정류전압이 2V 이상일 때 트랜지스터가 작동하여 주전원을 공급하고 이에 따라 CPU가 동작하는 일련의 작업을 수행한다. 그리고 리더모듈이 다시 멀어지게 되면 트랜지스터는 정지하고 주전원도 차단되게 된다.

4.1.3 구동 프로그램

이상에서 설명한 바와 같이 RF 선량모듈은 대기상태(파워다운모드)를 유지하다가 리더모듈이 근접하면 주전원이 들어오게 된다. 그 후 RF 선량모듈은 그림 7과 같이 프로그램된 일련의 동작을 수행한다.

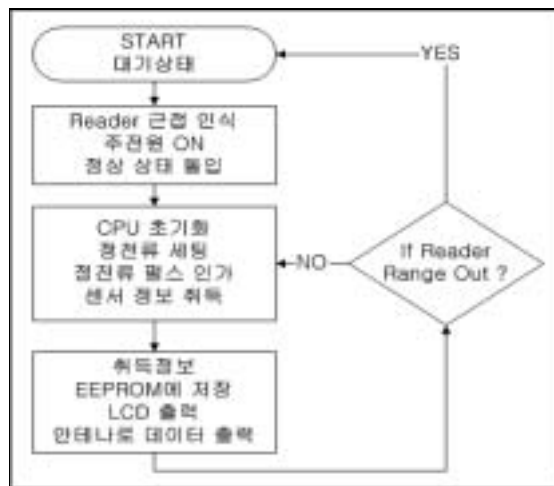


그림 7. RF형 도시메타의 프로그램 흐름도

스위칭부의 작동으로 전원이 들어오게 되면 CPU 및 변수가 초기화되고, 센서 정보 취득을 위해 출력할 정전류 값이 설정된 다음 CPU에서 정전류 펄스를 센서에 인가하여 센서 양단에 나타나는 전압을 추출한다. 이 정보는 EEPROM에 저장과 동시에 LCD로 출력되고, 안테나를 통하여 RF 데이터의 형태로 출력되게 되는 일련의 과정들을 거치게 된다.

4.2 RF 리더모듈

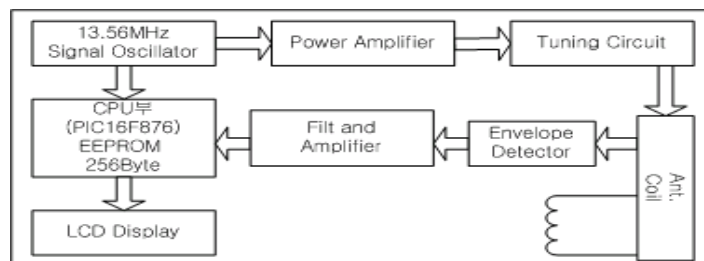


그림 8. RF형 Reader의 BLOCK DIAGRAM

RF형 리더모듈은 13.56MHz로 기본 발진하며, 안테나를 통하여 전력을 전송하기 위한 부분과 안테나에 유기되는 RF 신호를 처리하는 두 부분으로 나누어진다. 그림 7에 나타난 바와 같이 전력을 전송하기 위해 발진한 구형파는 전력 증폭하여 튜닝회로를 거쳐 정현파의 형태로 안테나에 실리고, 코일에 유기된 RF 데이터는 Envelope Detector, 필터와 증폭기, 비교기를 거치면서 디지털 데이터로 CPU에 입력이 된다.

4.2.1 수신 데이터의 형태

초당 수신되는 데이터의 형태는 그림 8과 같다. 수신되는 2 바이트 데이터의 상위와 하위를 구분하기 위하여 1, 1 과 1, 0 의 식별비트를 사용하였고, 나머지 각 여섯 비트들은 실제 센서의 데이터가 된다.



그림 9. 수신 데이터의 형태

4.2.2 RF형 리더 프로그램 구성

RF 리더모듈의 데이터 취득을 위한 내부 프로그램의 흐름은 다음 그림 10와 같다.

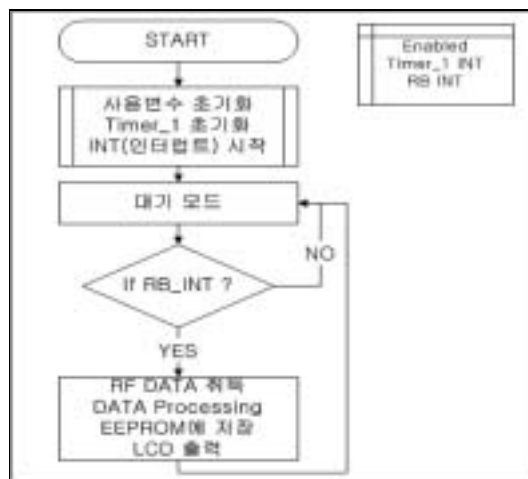


그림 10. RF 리더모듈의 프로그램 구성

RF형 선량모듈에서 송신되는 데이터는 리더부의 안테나 수신회로 부분을 거쳐 디지털 데이터로 가공되며, 처리된 데이터는 CPU로 입력되는데, 이때 최초 수신 데이터의 비트 반전여부를 판단하여 프로그램을 시작하게 된다. 데이터의 0, 1 구분은 비트 반전과 Timer_1 인터럽트를 조합하여 구분되며, RF 신호 수신 후 취득된 데이터를 처리하고, EEPROM에 저장 및 LCD에 출력하게 된다.

5. RF형 선량모듈과 RF 리더모듈의 통신실험

5.1 실험 조건

제작된 RF형 선량모듈과 리더모듈을 사용하여 두 장치 간 실제 통신 실험을 수행하기 위해 실험 장치를 그림 11과 같이 구성하였다. 실험에서 안테나 간의 거리는 5cm 이며, 리더모듈이 근접하자 RF형 선량계 모듈에 주전원이 스위칭 작동되어 LCD가 동작하는 상태를 보여주고 있다.

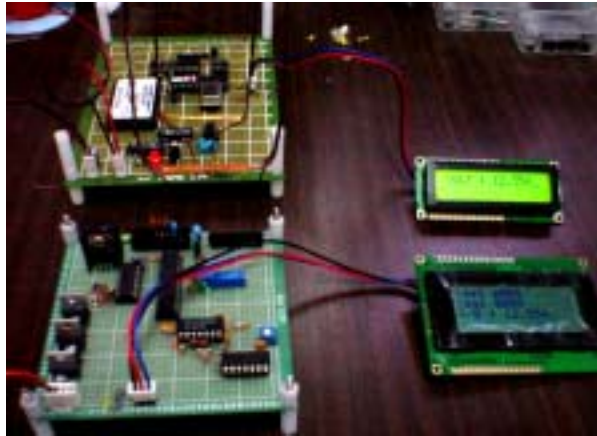


그림 11. 통신 실험 모습

5.2 데이터 송신

그림 12는 RF 선량계 모듈의 스위칭 릴레이로 입력되는 여기신호 데이터를 확대한 파형이며, 200us 간격의 ON, OFF 신호들은 하나의 ON 신호로 처리된다.

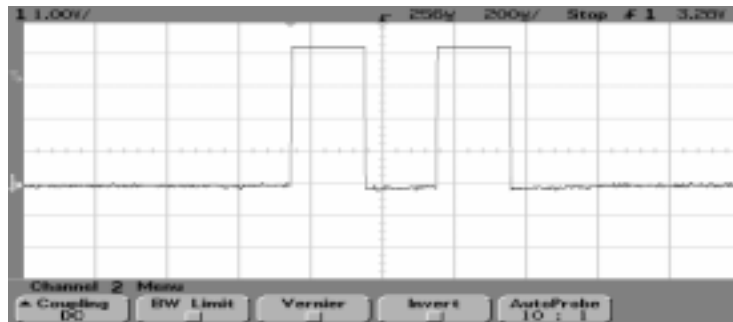


그림 12. 데이터 송신 신호를 확대한 파형

그림 12와 같은 데이터의 연속 반복 입력상태를 확인해 보기 위하여 스크프의 시간 축을 2초 간격으로 늘린 상태의 파형이 그림 13에 나타나 있다. 0과 1로 ON, OFF 식별이 가능하다.

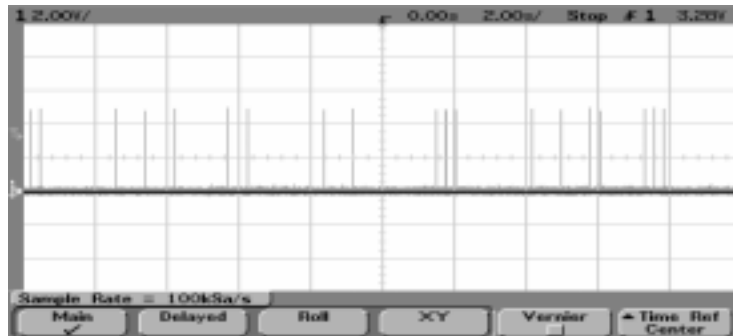


그림 13. 송신 데이터의 연속 상태 표시

5.3 데이터 수신

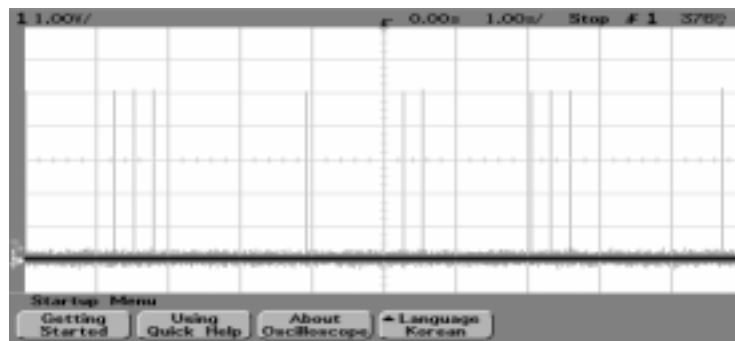


그림 14. RF 리더모듈의 비교기를 거쳐 디지털화 된 데이터

그림 14는 리더모듈의 비교기를 거쳐 디지털화 된 수신 데이터의 파형을 보여 주고 있다. 그림 12의 송신 데이터와 유사한 모습을 나타내고 있으며, 이 수신 파형은 PIC16F876의 B7번 포트에 입력으로 되면서 비트반전 인터럽트를 발생시키게 된다.



그림 15. 데이터 처리 후 디스플레이 된 모습

그림 15는 수신 데이터가 신호처리과정을 거친 후 LCD 창에 디스플레이 된 모습을 보여 주고 있으며, 그림에서 위쪽 LCD는 RF 선량모듈의 출력 LCD이며, 아래는 RF 리더모듈의 LCD이다. 선량모듈의 LCD에 디스플레이된 12.591V는 MOSFET의 10 μ A 소스(Source) 정전류에 대한

출력전압을 표시하고 있다.

아래의 LCD에는 e08f와 080f, 12.591 세 가지의 값을 표시하고 있는데, 여기서 e08f는 11xxxxxx, 10xxxxxx를 나타내고 있으며, 080f은 00xxxxxx, 00xxxxxx를 나타내고 있다. 그리고 맨 아래 줄에는 상위 6비트 유효 비트와 하위 6비트 유효비트를 결합하여 연산한 결과인 12.591가 표시되어 있으며, 이를 통해 양 모듈 간에 정확한 데이터의 송수신이 이루어짐을 확인할 수 있다.

7. 결론

본 논문에서는 가동중 원자로 구역 내의 설치된 MOSFET 방사선량 모듈에 RF 리더모듈을 탑재한 이동로봇을 접근시켜 비접촉 방식으로 방사선 피폭 누적량을 실시간 추출하기 위한 원격 측정장치 개발에 관하여 논하였다. 선량모듈과 리더모듈로 구성된 RF형 비접촉식 선량장치의 개발에 있어 필요한 일련의 사항들에 대하여 주요 기능별로 살펴보고, 두 모듈에 대한 설계와 제작을 완료하였다. 개발된 전체 선량모듈에 대한 통신평가 실험에서, 리더모듈의 송신 RF 데이터로부터 전원 기동된 선량계 모듈이 MOSFET 센서의 측정값을 다시 리더모듈로 정확히 송신하고 있음을 확인할 수 있었다. 개발된 RF형 비접촉식 방사선 선량계는 원자로내 주요기기 및 구역전체에 대한 피폭 방사선 매핑화에 유용할 것으로 생각되며, 고준위 방사선량 측정에서의 효율성 향상과 안정성 제고에도 기여할 것으로 판단된다. 향후 무전원 RF형 방사선량계의 개발과 측정 비접촉 거리의 연장에 대한 연구를 계속할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] G. Mackay, I. Thomson, C. R. Hirning, and M. Zeya: "*Gamma-ray Dose Mapping in Operational CANDU Reactor Containment Areas using MOS Dosimeters*," ASTM publication, pp. 441~446, 1994.
- [2] Andrew Holmes-Siedle, Leonard Adams, J. Stephen Leffler, and Steven R. Lindgren: "*The RADFET System for Real-Time Dosimeter in Nuclear Facility*," IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983.
- [3] Andrew Holmes-Siedle: "*The Space-Charge Dosimeter*," Nuclear. Instruments. & Methods, vol. 121, pp. 169~179, 1974.
- [4] "RF/ID 해외 응용 사례" 월간 자동화 기술, pp. 104~111, 1996.
- [5] Floyd, R.E. "Radio Frequency identification", Electrical and Computer Engineering, Canadian Conference on, vol.1, p377-380, 1993