

논문 2016-53-11-13

핀 포토다이오드를 이용한 보급형 라돈 검출기의 구현

(Implementation of Popular Radon Detector Using Pin Photodiode)

윤 성 하*, 김 재 학*, 김 규 식**

(Sung-Ha Yun, Jae-Hak Kim, and Gyu-Sik Kim[©])

요 약

라돈이 기관지나 폐포에 머무르게 될 때 라돈의 붕괴로 인해 자핵종(알파선, 베타선, 감마선 등)들이 생성되면서 이것들이 방사선을 방출하는데 세포의 염색체에 돌연변이를 일으켜 폐암을 발생할 가능성이 존재한다. 다시 말해 폐암의 원인이 라돈가스 때문이라기보다는 흡수된 일부 라돈의 붕괴로 인해 생기는 부산물이 방사선을 방출하기 때문이라고 할 수 있다. 사람이 연간 노출되는 방사선의 82%가 자연방사선에 의한 것인데 그중 대부분이 라돈이다. 실내의 라돈 농도를 적절하게 제어할 수 있다면 폐암의 발생확률을 30%나 억제할 수 있다고 알려져 있다. 아직까지 실내의 라돈의 농도를 측정하는 데는 외국의 라돈 센서를 사용하고 있는 실정이다. 실내 라돈 방출량에 대한 데이터 구축과 국내에 맞는 실용적인 라돈측정기기를 개발하도록 하는 연구가 필요하다. 본 논문에서는 PIN Photodiode를 이용하여 라돈의 농도를 측정하는 라돈 검출기 구현 방법을 제안한다. 실험을 통해서, PIN photodiode의 라돈 센서 모듈로서의 이용 가능성에 대하여 확인하였다.

Abstract

When radon is staying at alveoli and bronchial tubes, the collapse of radon creates progeny nuclides (alpha ray, beta ray, gamma ray, etc.). They emit radiation causing a mutation in the chromosome of the cell, resulting in lung cancer. In other words, the main cause of lung cancer is radiation emitting as the result of radon collapse rather than radon gas. The 82% of radiation exposed to people is the natural radiation. Most of the natural radiation is radon. If we properly control the concentration of radon indoors, the probability of occurrence of lung cancer could be decreases to be 70%. Until now, to measure the indoor radon concentration, imported radon sensors are needed. So, DB construction of indoor radon emission and popular radon measuring apparatus should be developed. In this paper, we propose the radon detecting method using PIN photodiode. Also, we confirmed the PIN photodiode could be used as radon sensor module through some experimental studies.

Keywords : radon, radon detector, PIN photodiode, radon concentration, radon measuring apparatus

I. 서 론

자연계에 존재하는 우라늄이 자연적으로 방사성 붕괴하는 과정에서 라듐이 발생하는데, 라듐이 붕괴할 때 생성되는 라돈은 무색, 무취, 무미의 성질을 가진 비활성기체이다. 공기보다 9배나 무겁기 때문에 바람이 불지 않는 실내에 축적되기 쉽고, 특히 동위원소 중 대부

분을 차지하는 라돈 222의 경우 반감기가 3.82일로 타 동위원소에 비해 상대적으로 긴 반감기를 가지기 때문에 멀리까지 이동하여 피해를 줄 수 있다. 사람이 호흡하는 과정에서 흡수되는 라돈은 대부분 호기과정을 통해 바로 밖으로 배출되어 큰 피해는 끼치지 않는다. 하지만 라돈이 기관지나 폐포에 머무를 때 방사성 붕괴로 인해 라돈의 폴로늄, 알파선, 베타선 등 자핵종의 발생으로 인해 체내에서 방사능을 발산하게 되고 세포에 돌연변이를 일으켜 폐암을 유발한다. 세계보건기구(WHO)의 보고에 따르면, 흡연 다음으로 가장 큰 폐암 발병원인으로 라돈을 지목하고 있고 유엔 산하 국제 암 연구소(JARC)에서도 라돈을 발암성 등급 1군으로 분류하고 있다. 미국에서는 라돈의 적정 농도 기준을 4pCi/L ($=148\text{Bq/m}^3$)으로 정하고 있다. 2011년부터 2012년까지

* 학생회원 ** 정회원, 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 (Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Seoul)

[©] Corresponding Author (E-mail : gskim318@uos.ac.kr)

※ 본 연구는 환경부(MOE) “생활공감 환경보건기술개발” 사업의 지원으로 수행되었습니다.(NO.2015001350001)

Received ; July 8, 2016

Revised ; October 19, 2016

Accepted ; October 24, 2016

국내 주택 라돈 조사 결과에서 조사 대상 주택의 약 22%가 이 기준을 초과한 것으로 드러났다.

지금까지 라돈 농도를 측정하기 위해 다양한 종류의 방법 및 장비들이 제안되어 왔다. CR-39 플라스틱 트랙 탐지기를 이용해 저 농도 라돈 측정을 위한 라돈 가스 포집 챔버가 제안되었고^[1], 빛은 차단하면서 라돈 가스의 확산을 돕는 대전된 고압 필터를 장착한 라돈 탐지기도 개발되었다^[2]. 알파 입자를 탐지하는 MOS IC를 이용한 수동형 라돈 모니터와 라돈 자핵종 포집기로 업그레이드 된 라돈농도 측정을 구현할 수 있게 되었다^[3]. 그리고 정전기적 집진기와 업그레이드된 시스템을 이용하여 반응이 빠른 라돈 탐지기를 개발하였다^[4]. 플라스틱 터널을 금속화시켜 구현한 정전기 집진기는 웹캠으로부터 광학적 이미지 센서의 노출된 표면 위에 대전된 라돈의 부산물들이 집중되게 하여 라돈 농도 측정 방법을 향상시켰다^[5]. 집진된 부산물들의 방사성 알파붕괴로 인해 발생한 알파입자들이 이미지 센서 표면에 충돌하면서 이미지 센서 픽셀들의 전하가 충분히 포화될 수 있도록 만들어주는 CCD 이미지 센서 모듈을 사용한 라돈 검출기도 구현되었는데^[6], 이것은 CCD 이미지 센서도 라돈 센서로 이용이 가능함을 보였다.

본 논문에서는 핀 포토다이오드 센서를 이용해 라돈의 검출에 대한 가능성을 실험적인 방법을 통해 확인하였다. 핀 포토다이오드 센서에서 출력된 신호를 이용해 MCU(Micro Controller Unit)에서 라돈 검출 여부를 인식할 수 있도록 검출 회로를 설계하여 보급형 라돈 검출기를 구현하였으며, 실험을 통해 핀 포토다이오드 센서를 이용한 보급형 라돈 검출기의 실용화 가능성을 확인하였다.

II. 본 론

2.1 핀 포토다이오드 센서를 이용한 라돈 측정

핀 포토다이오드 센서를 이용한 라돈농도의 측정은 라돈 원소 1개가 방사성 붕괴할 때 알파입자 1개가 발생한다는 특성을 이용하여 시간당 발생한 알파입자의 발생 빈도를 핀 포토다이오드의 변화를 측정해 계산한다. 알파입자는 매우 큰 운동에너지를 갖고 있고 물질과 파장이 매우 짧은 특성이 있어 대부분의 물질들을 관통하지 못한다. 얇은 종이나 유리도 알파입자 입장에서는 얇은 두께라고 볼 수 없기 때문에 센서 위에 알파입자의 침투를 가로막는 방해물이 있으면 검출이 안 된다. 따라서 에폭시 윈도우 등 센서를 보호하기 위한 물질이

있는 경우, 이를 제거한 핀 포토다이오드 센서를 사용해야 한다. 알파입자가 핀 포토다이오드 센서에 부딪칠 때, 부하회로에서 발생하는 전압의 변화도 매우 작기 때문에 이를 증폭 및 필터링하여 MCU가 받아들일 수 있는 디지털 신호로 바꾼 후 처리해야 한다.

라돈이 붕괴하면서 발생하는 알파선은 고에너지를 갖는 전자기와 방사선에 속한다. 알파 입자는 특정 세기를 갖는 광자의 일종이라고 볼 수 있다. 빛을 이용하여 핀 포토다이오드 센서에서 에너지를 생산하려는 목적이 아니므로 광기전력 모드(photovoltaic mode)가 아닌 광전도 모드(photoconductive mode)를 사용하여 라돈을 검출한다. 아래 그림 1은 라돈 검출 실험을 위해 사용된 핀 포토다이오드 센서 모듈이다.

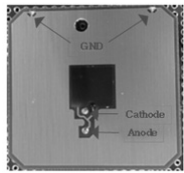
	module 크기	43×43 mm
	sensor 크기	10×10 mm

그림 1. 핀 포토다이오드 센서 모듈
Fig. 1. PIN photodiode sensor module.

핀 포토다이오드 센서를 이용한 라돈 검출의 원리를 살펴보면, 그림 2와 같이 순방향 바이어스 전압을 건 상태에서 라돈이 센서에 부딪치면 핀 포토다이오드 센서의 순방향 전류가 감소하게 되고 따라서 부하 저항 R에 걸리는 전압 V_{out} 가 순간적으로 하강하는데 이를 신호 처리하여 라돈검출을 확인한다.

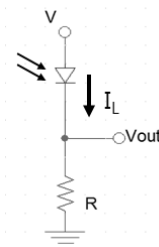


그림 2. 순방향 바이어스 광전도 모드
Fig. 2. Photoconductive mode with forward bias.

그런데 이 전압 V_{out} 의 변동은 매우 작아 MCU가 인식하도록 적절한 신호처리를 해야 한다. 그림 3은 V_{out} 신호의 작은 전압 변화를 증폭 및 필터링을 통해 MCU가 디지털적으로 인식 가능한 큰 펄스 신호로 바꾸는 회로도이며 이 회로도의 파형들은 그림 4에 있다.

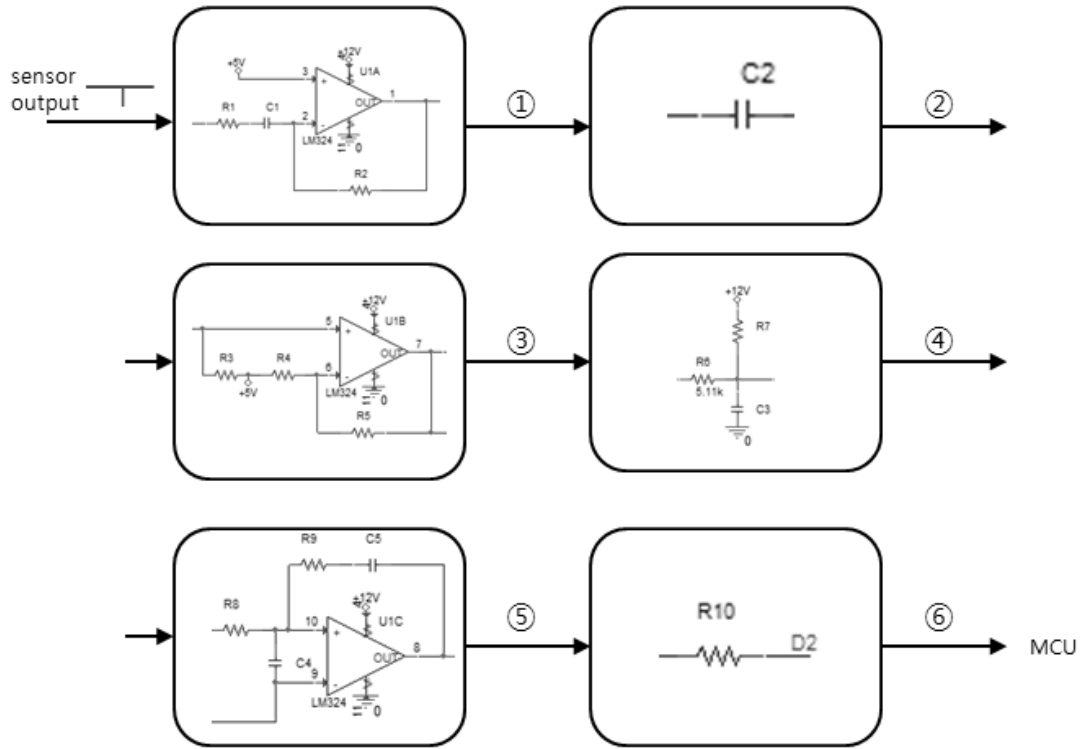
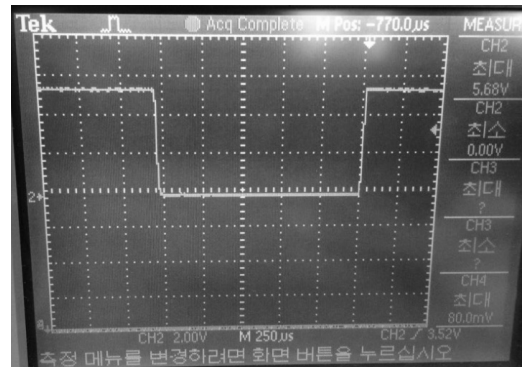


그림 3. 신호-펄스 변환 회로도
Fig. 3. Signal-pulse converter circuit.

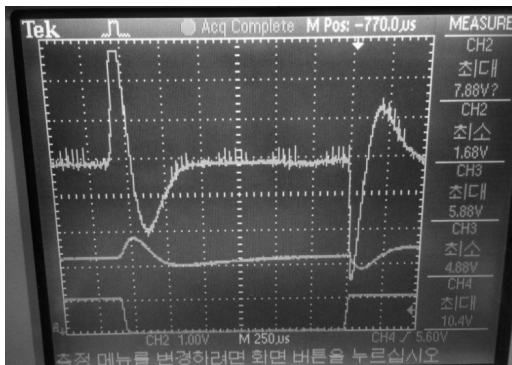


(a) 위 : ① 파형, 중간 : ② 파형



(c) ⑥ 파형

그림 4. 신호-펄스 변환 회로의 파형들
Fig. 4. Waveforms of signal-pulse converter circuit.



(b) 위: ③ 파형, 중간: ④ 파형, 아래: ⑤ 파형

핀 다이오드 센서에서 미세한 전압 변동이 발생하면 첫 번째 회로에서 신호를 증폭하여 그림 4의 ①과 같은 파형을 만들어 낸다. 이 증폭된 신호는 커플링 캐패시터를 통과하면서 DC 성분을 제거하고 AC 성분만 다음 회로에 전달하는데 그 곳에는 5V의 바이어스 전압이 걸려 있기 때문에 ②와 같은 파형이 된다. 세 번째 회로를 거치면서 한 번 더 증폭되어 ③과 같은 파형을 만들고, 차단주파수 300Hz인 저역통과필터를 거치면서 노이즈가 제거되고, 신호의 진폭도 같이 줄어들게 되면서

④와 같은 과형이 발생하게 된다. ④번 과형은 다섯 번째 회로를 통과하면서 펄스로 변환되고, ⑤의 과형으로 만들어지게 된다. 이때, op amp 에는 12V의 공급전압이 들어가기 때문에 ⑤의 과형은 약 11V의 최대전압을 내는데, 직렬 저항을 거치면서 MCU에서 허용할 수 있는 전류로 낮아지고 MCU에 내장된 보호 다이오드로 인해 약 5V로 전압이 하강되어 들어간다. 하강 펄스의 인식은 MCU에서 하강 에지가 일어나는 순간 카운트를 세는 외부 인터럽트 기능을 이용해 소프트웨어로 처리된다.

2.2 핀 포토다이오드 센서를 이용한 라돈 검출기 구현

앞서 언급했듯이 라돈의 붕괴로 인한 알파 입자가 핀 포토다이오드 센서에서 검출되면, 센서의 출력에 작은 하강 신호가 발생하고 이 신호는 신호-펄스 변환 회로를 통해 증폭 후 필터링 회로를 거쳐 최종적으로 5V 크기의 하강 펄스가 출력된다. MCU로 아두이노를 사용하는 라돈 검출기 모듈이 라돈 검출 센서 모듈에서 출력되는 하강 펄스 신호를 입력받아 알파 입자 검출 시 하강 에지를 인식하여 인식 횟수를 카운트하는데, 한 시간마다 해당 시간 동안 검출된 알파입자의 발생 빈도를 기록하여 저장한다. 측정된 발생 빈도 및 측정 시간과 관련된 데이터들은 아두이노의 비휘발성 내장 메모리에 저장되어 실험이 끝난 후 결과를 추출할 수 있도록 하며, 측정하는 동안에도 그림 5와 같이 LCD (Liquid Crystal Display) 모듈을 통해 측정 상황을 표시하여 육안으로 확인할 수 있도록 구현하였다. 그림 6은 LCD 모듈을 포함하여 MCU인 아두이노 보드, 그리고 핀 포토다이오드 센서에서 발생한 출력을 읽어 들이는 라돈 검출기 모듈이다.



그림 5. 라돈 측정 결과 표시용 LCD 모듈
Fig. 5. LCD module displaying radon concentration data.

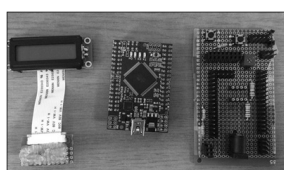


그림 6. LCD, MCU 및 라돈검출기 모듈
Fig. 6. LCD, MCU, and radon detector module.

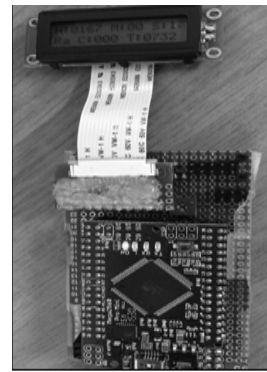


그림 7. 조립된 라돈 검출 시스템
Fig. 7. Assembled radon detecting system.

그림 6에서 LCD 모듈은 측정 상황을 확인하고 올바른 동작 여부를 확인한다. MCU 모듈은 12V 어댑터 전원을 공급 전원으로 동작하는데 모듈 내에 레귤레이터 회로를 포함하고 있어 5V와 3.3V의 전압원이 존재하며, 이를 이용해 LCD 모듈에 전원을 공급하여 동작시킨다. MCU 모듈에서는 라돈을 측정하는 시간과 센서 모듈에서 발생하는 신호를 측정하여 각 시간별로 데이터를 정리 및 저장하는 역할을 한다. 라돈검출기 모듈은 그림 3의 신호-펄스 변환회로를 내장하고 있다. 그림 7은 그림 6의 세 가지 모듈을 조립한 상태를 보여준다.

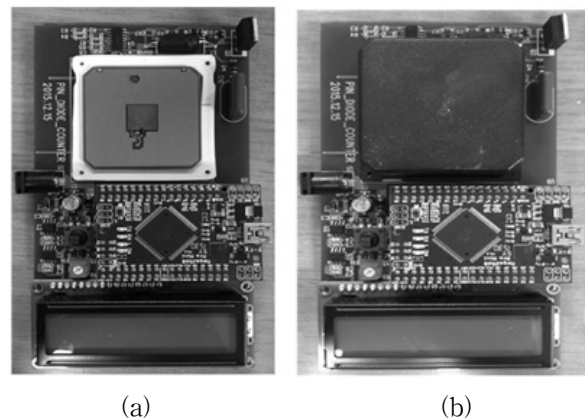


그림 8. 핀 포토다이오드 라돈 검출기 구현
Fig. 8. Implemented PIN photodiode radon detector.

그림 8은 그림 1의 라돈 검출 센서 모듈과 그림 7의 라돈 검출 시스템을 결합한 프로토타입의 핀 포토다이오드 라돈 검출기를 보여준다. 그림 8(a)는 LCD 모듈, MCU 모듈, 핀 포토다이오드 센서 모듈을 조립한 모습이고, 그림 8(b)는 여기에 빛을 차단하는 암흑 챔버를 덮어씌운 완성된 핀 포토다이오드 라돈 검출기를 보여준다. 핀 포토다이오드 센서 주변으로 고무 패드를 이용하여 암흑 챔버를 조립할 때 틈새로 외부의 빛이 새

어 들어가지 못하게 막았으며, 핀 포토다이오드 센서의 아랫부분에는 몇 개의 작은 구멍들이 뚫려 있어 외부와 공기가 통하도록 한다. 외부의 공기 중에 존재하는 라돈 가스가 라돈 검출기 아랫부분의 구멍을 통과해 유입되고, 암흑 챔버 내부에서 붕괴되어 알파 입자가 핀 포토다이오드 센서에서 검출되면 신호-펄스 변환 회로를 통과하며 하강펄스로 변환된 신호를 MCU 모듈에서 인식하여 매 시간동안 검출된 알파 입자의 개수를 측정한다.

2.3 라돈 검출기 실험 및 고찰

핀 포토다이오드 센서를 이용한 라돈 검출기의 성능을 테스트하기 위해 라돈 시료가 있는 실험 챔버와 라돈 시료가 없는 실험 챔버를 각각 설치하고 일주일 간 측정하였다. 그림 9는 핀 포토다이오드 센서를 이용한 라돈 검출기의 라돈 유무에 따른 검출 결과를 확인하기 위한 실험 장치이다. 라돈 시료로는 라돈을 지속적으로 발생시키는 토양 시료를 사용했다. 챔버의 크기는 40 x 27x50cm의 직육면체 투명 아크릴 재질이며, 실험 챔버들에 각각 라돈 검출기를 넣은 후 실험 챔버 하나에는 라돈 시료가 있고 다른 하나에는 라돈 시료가 없는 조건에서 밀봉하여 3일간 라돈 농도가 포화되기까지 대기한다. 이후 168시간 동안 라돈 검출기를 동작시켜 라돈의 농도를 측정하였으며, 1시간 주기로 라돈 검출 카운트를 저장한다. 또한, 기존 제품과의 성능 비교를 위해 본 연구에서 구현한 핀 포토다이오드 라돈 검출기 이외에도 수입제품인 사이렌 프로 3 라돈 검출기를 넣어 결과를 비교하였다. 그림 10의 누적 그래프에서도 볼 수 있듯이 시간의 흐름에 따른 시간당 알파입자 카운터 수의 누적량이 일정한 기울기를 갖고 증가한다. 실험 챔버 내에 라돈 가스가 완전히 포화되어 농도가 일정한 상태로 만들었기 때문이다. 라돈 시료가 있는 실험 챔버에 측정 오차 20%인 성능을 갖는 기성제품인 사이렌 프로 3 라돈 측정기를 같이 넣어 비교했을 때, 사이렌 프로 3 라돈 측정기 농도 수치는 15.3pCi/L이었다. 위 결과를 토대로 시간당 평균 4.38개의 알파 입자가 발생할 때 라돈농도가 약 15.3pCi/L임을 알 수 있었다. 그림 11은 라돈 시료가 있는 실험 챔버에서 구현된 핀 포토다이오드 타입 라돈 검출기와 기성 제품인 사이렌 프로 3의 시간당 라돈카운터 수의 누적치를 비교한 결과이다. 사이렌 프로 3의 경우 같은 농도에서 시간당 평균 2.74개의 펄스 신호가 측정되었으며 구현된 라돈 검출기는 사이렌 프로 3보다 약 1.5배의 카운터 수를 보인다. 위 실험들을 통해 구현된 포토다이오드 타입

라돈 검출기의 상품화 가능성과, 기성제품보다 민감도 (sensitivity)에서 더 우수함을 확인할 수 있었다.



그림 9. 라돈 검출기 성능 실험 장치
Fig. 9. Experimental apparatus for performance evaluation of radon detector.

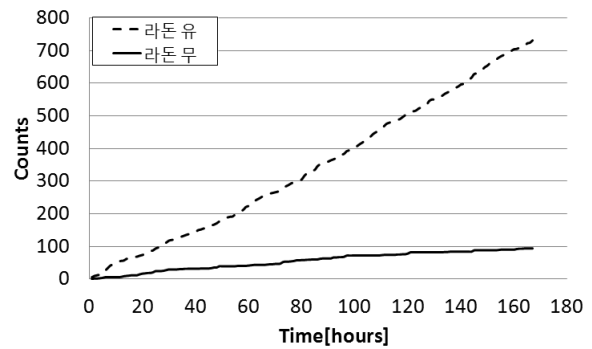


그림 10. 라돈 유무에 따른 라돈검출기의 시간당 라돈카운터 수의 누적 그래프
Fig. 10. Graph of accumulated radon counter number with or without radon generating soil.

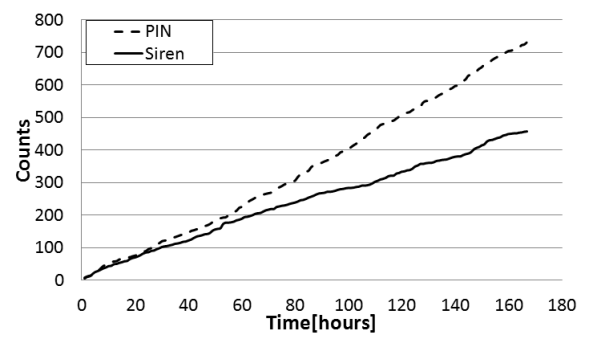


그림 11. 구현된 라돈 검출기와 사이렌 프로 3의 시간당 라돈카운터 수의 누적 그래프
Fig. 11. Graph of accumulated radon counter number for implemented radon counter and Siren Pro 3.

마지막으로, 본 연구에서 구현한 시제품을 연세대 라돈실험센터에 의뢰해 성능평가하였다. 정밀한 라돈측정치와 비교 평가를 위해, 고가의 라돈측정장비인 RAD7

과 기존 제품인 사이렌 프로 3, 그리고 시제품을 라돈 챔버와 라돈시료를 이용하여 5일간 실험한 사진이 그림 12에 있다. 이들 실험한 결과 데이터가 그림 13에 있다. 그림 13 (a)와 (b)는 각각 시제품과 사이렌 프로 3의 시간당 라돈 카운트 수와 그 시각에서의 RAD7 라돈농도를 점으로 찍은 그래프이다. 가로축은 RAD7 라돈농도를 pCi/L 단위로 나타내었고 세로축은 시제품과 사이렌 프로 3의 시간당 라돈 카운트 수를 나타낸다.

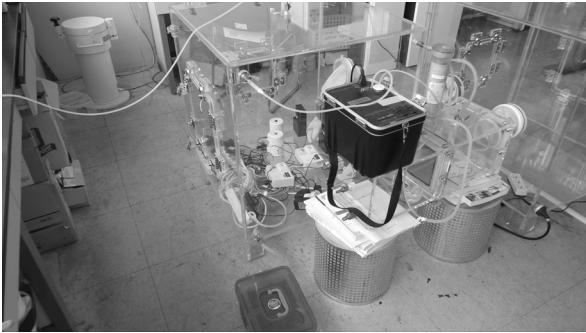
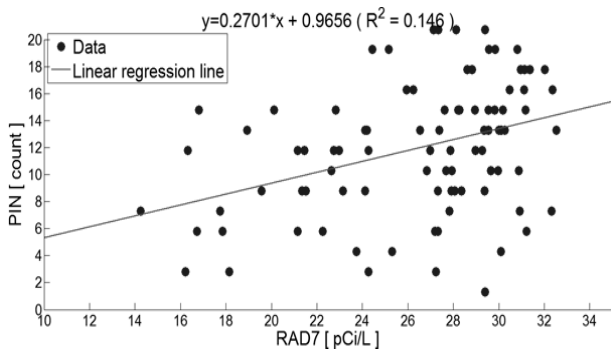


그림 12. 라돈 검출기의 성능 비교 평가
 Fig. 12. Performance evaluation and comparison of radon detector.

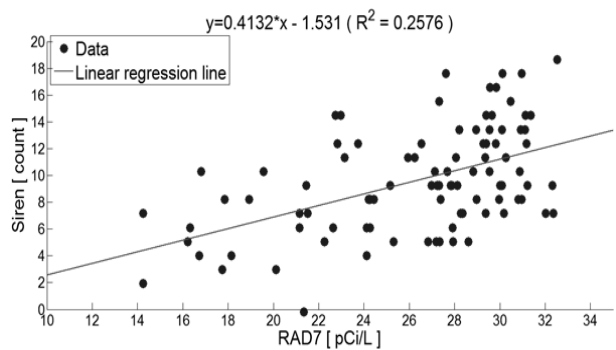
그림 13 (a)와 (b)를 비교해 보면, 시제품보다 사이렌 프로 3의 RAD7과의 상관도가 조금 나은 것으로 보여진다. 시제품의 성능을 더 개선하기 위한 노력이 필요하다. 한편, 기존 사이렌 프로 3는 전원을 켜 후 48시간 후부터 7일 평균데이터를 표시하는 것을 감안해서 본 실험에서는 48평균데이터를 선형회귀분석한 결과가 그림 13 (c)와 (d)에 있다. 성능면에서 거의 차이가 없어 보인다. 본 연구의 시제품을 조금 더 개량하여 보급형의 저가모델로 상품화 한다면 국내 저가 라돈카운터로서의 가치가 충분히 있을 것으로 판단된다. 사이렌 프로 3가 시중에서 10만원 후반대로 판매되고 있는데, 본 시제품을 양산한다면 10만원 초반대로 판매가능하며 추가로 와이파이가 가능한 무선기능을 탑재하여 그 용도를 넓히고자 추진중이다. 본 연구와 유사한 핀포토다이오드 타입의 보급형 라돈카운터의 개발은 국내에서 두세차례 시도하였으나, 현재 상용화는 되지 못한 상황이다.

III. 결 론

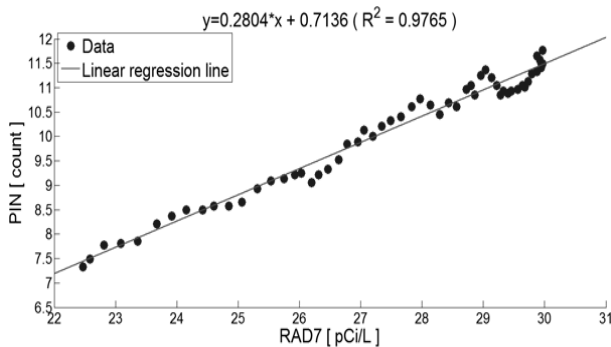
본 연구에서는 핀 포토다이오드 센서를 이용하여 라돈 검출기를 구현하였고, 라돈 시료의 유무를 조건으로



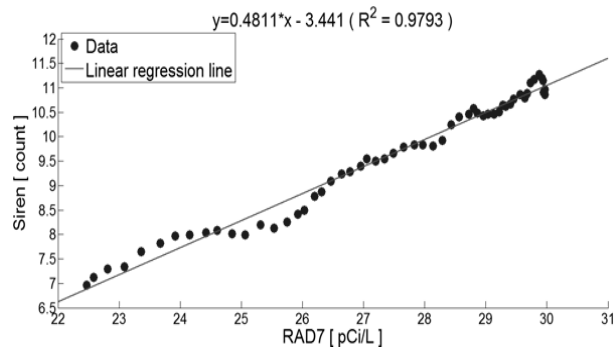
(a) RAD7 과 시제품의 측정치 비교



(b) RAD7 과 사이렌 프로 3의 측정치 비교



(c) RAD7 과 시제품의 48시간 평균치 비교



(d) RAD7 과 사이렌 프로 3의 48시간 평균치 비교

그림 13. 시제품과 사이렌 프로 3의 선형회귀분석
 Fig. 13. Linear regression analysis of implemented radon counter and Siren Pro 3.

라돈 검출 및 성능 실험을 실시하였다. 라돈의 붕괴에 의해 발생하는 알파입자를 검출할 때 핀 포토다이오드 센서에서 발생하는 출력 신호를 MCU 에 입력 가능한 디지털 펄스 신호로 변환하는 회로를 구현해 시험함으로써, 핀 포토다이오드 센서가 라돈 검출 센서로서 유용함을 확인할 수 있었다. 실험 결과로는 라돈 시료가 없는 경우 시간당 평균 0.58개, 라돈 시료가 있는 경우 시간당 평균 4.38개로 라돈 시료가 있는 경우의 라돈 검출 센서 모듈의 출력 펄스 신호 발생 빈도가 높다는 것이 확연히 드러났다. 또한 기성 제품인 사이렌 프로 3와의 비교 실험을 통해 상품화 가능성을 타진하였고 기성 제품에 비해서 더 높은 민감도를 보이는 것을 확인하였다. 정밀측정기와의 비교평가에서는 사이렌 프로 3에 비해 시제품이 다소 성능이 미흡한 것으로 판단되나, 추가적으로, 선형회귀법을 이용한 정밀도 향상, 시제품을 덮는 케이스의 구조 및 크기에 따라 라돈 검출에 미치는 성능을 연구하여 핀 포토다이오드 센서 타입 라돈 검출기의 성능 개선을 위한 연구도 향후 필요할 것으로 사료된다.

- Global Journal of Engineering Science and Researches, Vol.2, No.9, pp. 59-62, Sept., 2015.
- [7] Yonsei University Industry Cooperation Foundation Report, "Development of the general-purpose indoor radon measurement sensor and system, 2010, 7.

REFERENCES

- [1] Hiroshi Miyake, Keiji Oda and Masami Michijima, "Portable and high sensitive apparatus for measurement of environmental radon using CR-39 track detector," Japanese Journal of Applied Physics, vol.26, No.4, pp. 607-610, April, 1987.
- [2] Peter J. Diamondis, "Radon gas measurement apparatus having alpha particle detecting photovoltaic photodiode surrounded by porous pressed metal daughter filer electrically charged as PO-219 ion accelerator," US patent, P.N. 5489780, Feb. 1996.
- [3] R. H. Griffin, H. Le, D.T. Jack, A. Kochermin and N.G. Tarr, "Radon monitor using custom a detecting MOS IC," in Proceedings of IEEE Sensors 2008, Lecce, Italy, pp. 906-909, Oct. 2008.
- [4] R.H. Griffin, A. Kochermin, N. G. Tarr, H. McIntosh, H. Ding, J. Weber and R. Falcomer, "A sensitive, fast responding passive electrostatic radon monitor," in Proceedings of IEEE Sensors 2011, Limerick, Ireland, Oct., 2011.
- [5] Ryan H. Griffin and N. Garry Tarr, "Optical image sensors and their application in radon detection," in Proceedings of SPIE, Vol.8915, pp. 8915C-1~7, Oct., 2013.
- [6] Gyu-Sik Kim, Tae-Gue Oh, "Implementation of radon detector using CCD image sensor module,"

— 저 자 소 개 —



윤 성 하(학생회원)
2000년 단국대학교 전자공학과 학사 졸업.
2011년 서울시립대학교 전자전기공학과 석사 졸업.

2014년~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사 과정
<주관심분야: 제어계측, 전력전자>



김 재 학(학생회원)
2016년 서울시립대학교 전자전기 컴퓨터공학부 학사 졸업
2016년~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사 과정
<주관심분야: 제어계측, 전력전자>



김 규 식(정회원)
1981년 서울대학교 전자공학과 졸업
1983년 동 대학원 제어계측공학과 석사 졸업
1990년 동 대학원 제어계측공학과 박사 졸업

1988년~1992년 대우중공업 중앙연구소 선임 연구원
1993년~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터 공학부 교수
2003년~2005년 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수(Visiting Scholar)
<주관심분야: 센서네트워크, 비선형제어, 에너지 변환>