

영상센서를 이용한 방사선원 위치탐지 연구

A Study on a position detection of radiation using CCD camera

이남호*, 최창환, 신호철, 정승호**

Nam-Ho Lee*, Chang-Wan Choi, Ho-Chul Shin, Seung-Ho Jung**

Abstract - CCD형 영상소자는 방사선 피폭 시 표면과 격자내부에 모두 손상을 받게 되며, 감마방사선이나 X선과 같은 고에너지의 이온화 방사선에 노출될 경우 격자 실리콘 내부에 전자-전공쌍(Electron-hole pair, EHP)이 발생된다. 이러한 EHP는 CCD의 순간 출력 광전류로 변환되어 백색 화소 형태의 영상잡음으로 가시화되며, 이 화소 수는 피폭 방사선량에 비례하여 증가하는 특성을 지니고 있다. 따라서 출력 영상정보를 분석하면 조사된 방사선의 양과 특성을 측정할 수 있다. 본 연구에서는 CCD를 이용하여 가상의 방사능 물질 누출 공간에서 방사선원의 방향과 거리정보를 고속으로 탐지하기 위한 장치와 고속 측정 알고리즘을 구현하고 실제 방사선장에서 실증시험을 수행하였다. 방사선 탐지기는 콘형 납 콜리메이터(Collimator)와 가시광 변환용 신틸레이터(CsITl) 및 차폐체로 구성된 센서부와 제어 및 방사광 신호처리를 수행하는 PC부로 구성된다. 감마방사선(⁶⁰Co) 방사선장 실증시험에서 방사선원간 거리 83cm에서 측정된 거리 탐지는 5.3%의 오차로 확인되었다. 이 방사선 탐지기는 임의의 고방사선 누출사고에 대한 초기대응 작업을 수행하기 위한 무인 이동로봇용 방사선 탐지기로 활용이 가능하다.

Key Words : Radiation, Scintillator, CCD, Detector, Robot, Collimator

1. 서론

구소련 우크라이나의 체르노빌 사고 이후 러시아와 미국 일본 등에서는 공동으로 미래의 방사능 비상사고에 대처하기 위한 기술 및 장치 개발에 관한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 다양한 비상대응용 로봇시스템에 대한 연구개발도 활발히 진행되고 있다. 비상대응용 로봇 시스템은 방사능 사고 환경에 투입되어 방사선 물질 탐지와 함께 비상상태에 대한 대응계획을 수립할 수 있는 정보를 제공하여야 한다. 이를 위해 사고환경 내에서 고준위 방사선원의 위치를 신속히 탐지할 수 있는 기술 및 장치의 개발이 필수적이다.

현재 국내외에서 방사선원의 위치를 탐지하기 위한 장치가 일부 개발되어 있으나 대부분 방사선원이 위치한 방향정보만을 제공하고 있으며 거리정보의 미비로 정확한 방사선량을 알 수 없다. 또한 고하중과 느린 탐지속도가 단점으로 알려져 있다.^[1] 따라서 이동로봇에 탑재되어 방사능 사고 현장에서 방사선원의 삼차원 위치를 신속히 탐지할 수 있는 센싱 기술의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 이동로봇용 고속 방사선 3차원 위치 탐지기 구현 연구의 일환으로 소형 CCD 카메라를 활용한 실시간 방사선 방향 및 거리 탐지기와 방사광 신호처리 및 방사선원 거리측정 알고리즘을 개발에 관하여 논하였다. 또한 실제 ⁶⁰Co 감마방사선원장에서 시험을 통하여 그 기능을 검증하였다.

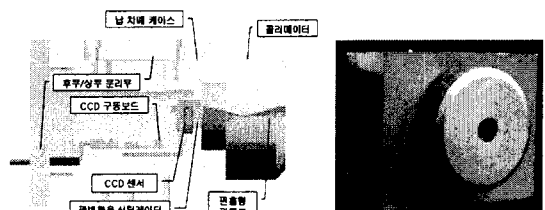
2. CCD를 이용한 방사선 탐지센서

2.1 영상센서의 방사선 특성

반도체형 영상소자(CCD 등)는 방사선 피폭 시 표면과 격자내부에 모두 손상을 받게 되며, 특히 감마방사선이나 X선과 같은 고에너지의 이온화 방사선에 피폭될 경우 광전 효과, 콤프턴 산란, 전자쌍 생성에 의해 센서 내부에 전자-전공쌍(Electron-hole pair, EHP)이 생성된다. 발생된 EHP는 CCD의 순간 출력 광전류로 변환되어 백색 화소(Pixel) 형태의 영상잡음으로 가시화되며, 이 화소 수는 피폭 방사선량에 비례하여 증가하는 특성을 지닌다. 그러므로 CCD 소자 출력 영상에서 방사광에 발생된 광 정보를 분석하면 조사되는 이온화 방사선의 양과 특성에 대한 간접 측정이 가능하다.

2.2 방사선 탐지센서의 구성

센서는 그림 1(a)와 같이 콘(Cone)형 콜리메이터, 광변환용 신틸레이터(Scintillator), CCD 영상센서, 그리고 차폐체(Pb)로 구성되고 실물 사진은 그림 1(b)와 같다.



(a) 내부 구성도 (b) 실물 사진
그림 1. 방사광 탐지 센서

저자 소개

* 準會員 : 韓國原子力研究所 前任研究員 工博

** 準會員 : 韓國原子力研究所 責任研究員 工博

CCD 센서 수광부를 제외한 카메라 전 부분을 20mm의 납(Pb) 케이스를 이용하여 차폐하고 CCD 부분으로 입사된 방사광으로부터 방사선원의 위치정보를 추출하기 위한 효율적인 구조의 방사광 집속장치(Collimator)를 콘형으로 설계하였다. 내각 30도의 콘형 콜리메이터의 방사선원 스캔 시 나타나는 CCD 탐지 감도의 변화를 확인하기 위해 MCNP 코드 시뮬레이션을 수행하였다. 120큐리 코발트(⁶⁰Co) 감마방사선원과 콘형 콜리메이터 두께와 혼의 중심각의 실측 데이터를 사용하여 각의 변화에 따라 센서의 단위 면적에 도달하는 방사선 입자의 단위 면적당(cm^2) 확률을 계산하였다. 그림 2의 탐지감도 특성과 같이 설계된 콜리메이터는 공간 방사선원의 고속 스캔에서 효율적임을 알 수 있다.

방사광 변화물질(Scintillator)은 콜리메이터와 CCD 센서 사이에 위치하여 감마 방사선을 가시광(光)으로 변환하므로 CCD 소자에서 방사광을 간접적으로 측정할 수 있다. 광 출력이 크고, 감쇠 시간과 광 도달 길이가 길며, 수분 흡수성이 작은 특성을 가진 신틸레이터인 CsI(Tl)를 $10 \times 10(mm^2)$ 의 단면적 구조로 제작하였고 전면 외 오면을 광 반사체로 도포하였다.

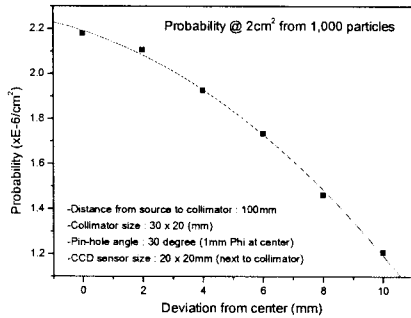


그림 2. 콘형 콜리메이터의 방사선원 탐지감도 MCNP 시뮬레이션 결과

3. 방사선 탐지장치

3.1 방사선 탐지부

그림 3(a)와 같이 두 대의 센서부와 회전장치 및 원격 PC에 구현된 제어 및 신호처리부로 구성되는 방사선 탐지부는 그림 4와 같이 원격 PC의 RS232 출력 명령으로 전방에 대해 스캔하면서 방사광 신호를 입력받게 된다. 이 영상과 위치정보는 PC로 보내져 신호처리 알고리즘과 거리탐지 수식에 따라 고속으로 방사선원의 방향 및 거리를 계산하게 된다. PC 구현 윈도우 프로그램은 MSVC++6.0 기반의 OpenCV를 사용하였고 그림 3(b)와 같다.

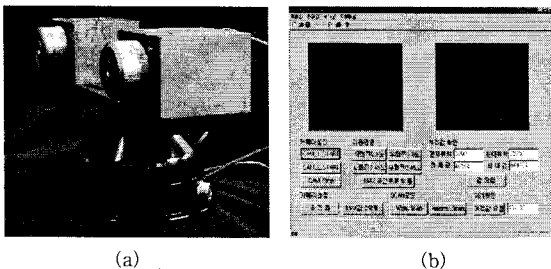


그림 3. 방사선원 위치 탐지기 및 제어/영상처리 프로그램 화면

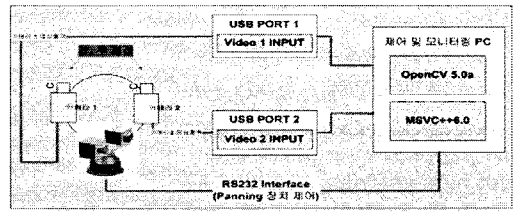


그림 4. 방사선 위치 탐지기 전체 구성

3.2 제어 및 영상 신호처리부

방사광 정보처리에 영상처리기술을 적용하면 고속 정보처리, 풍부한 디지털 영상정보, 다양한 필터 및 함수 제공 등으로 효율적인 신호처리 및 정보추출이 용이하다. 그림 5는 제어 및 신호처리부에서 방사선원의 방향과 위치를 찾는 과정을 도식적으로 보여 주고 있다.

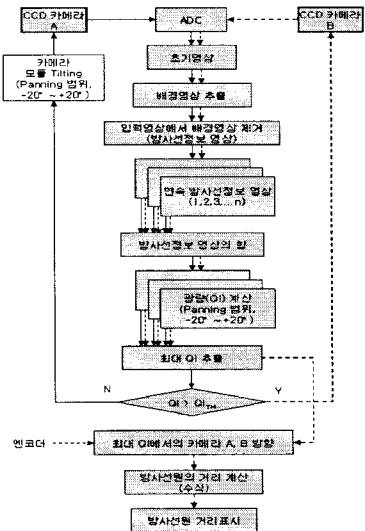


그림 5. 방사선원 방향 및 거리탐지 알고리즘

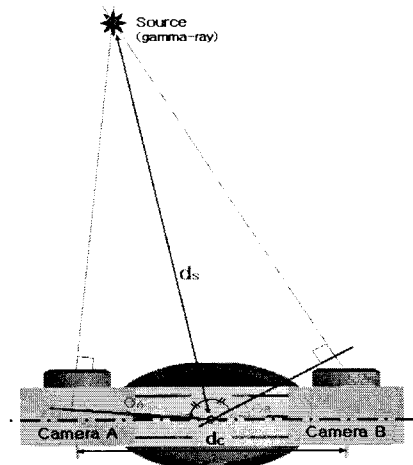


그림 6. 두 방사선 탐지기와 방사선원의 방향 및 거리 구조도

그림 5의 알고리즘으로부터 최대 방사광 입사방향에 대한 두 탐지센서의 방향정보(θ_A , θ_B)를 구할 수 있으며, 그림 6과 식 1에 의해 방사선원까지의 거리(d_s) 계산이 가능하게 된다.

$$d_s = \frac{d_c}{2} \operatorname{cosec}\left(\frac{180 - (\theta_A + \theta_B)}{2}\right) \quad (1)$$

여기서, d_c 는 두 카메라의 간격, θ_A 는 카메라 A의 최대 방사광 입력상태 회전각, θ_B 는 카메라 B의 최대 방사광 입력상태 회전각, d_s 는 방사선원과 카메라 모듈간의 거리를 나타낸다.

4. 방사선 탐지 실증시험

4.1 방사선원 방향 탐지능

제작한 방사선 탐지센서의 방향 탐지능을 분석하기 위해 그림 7의 거리 및 방향이동용 조사장치에 방사선 탐지센서를 탑재하고 선원으로부터 83cm 거리에서 회전방향에 따른 센서의 방사광 탐지감도의 변화를 원격에서 고찰하였다. 방사선원과 센서면의 수직방향으로부터 약 10도 범위에서 0.45도 간격으로 QI 값을 측정하여 그림 8에 나타내었다. 이 결과 그래프로 부터 제작한 탐지센서는 방향에 따른 방사선 탐지능을 충분히 가짐을 확인할 수 있었다.



그림 7. 거리 및 방향이동용 조사장치

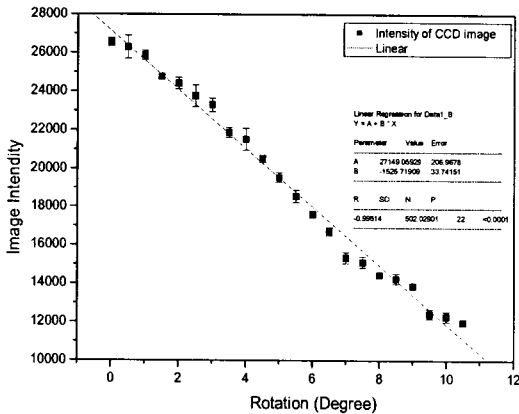


그림 8. 단위 회전각에 대한 영상 QI 감도 시험

4.2 방사선원 거리탐지

개발된 방사선 탐지장치의 방사선원 방향 및 거리 탐지 기능을 입증하기 위해 실제 방사선장인 원자력연구소 저준위 감마(^{60}Co)조사시설 내에서 방사선원으로 부터 83cm의 거리(230rad/h)에 탐지장치를 설치하고 외부 제어 PC를 이용하여 방사선원 방향/거리 탐지 기능을 시험하였다. 제 3의 카메라를 사용하여 작동과정을 그림 9에서와 같이 실시간 녹화한 시험에서 측정된 변수 d_c 는 24cm, θ_A 는 10° , θ_B 는 8.55° 로 확인되었으며 식 1에 의해 거리 d_s 는 78.83cm로 계산되었다. 이 결과 값은 방사선원과 탐지장치 간의 실제 거리 83cm에 대해 5.3%의 오차를 나타내고 있다.

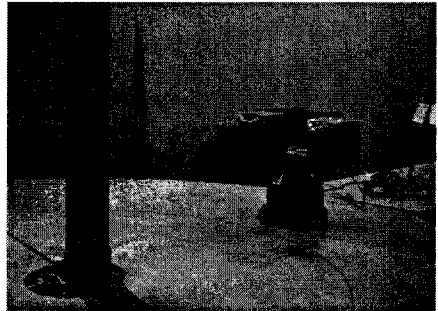


그림 9. 방사선장에서의 방사선원 위치 및 거리 탐지시험 현장

5. 결론

본 연구에서는 소형 CCD 카메라와 신틸레이터, 콜리메이터, 그리고 차폐체로 구성된 방사선 탐지센서를 개발하고 이 센서와 구동장치 및 신호처리 알고리즘으로 이루어진 탐지장치를 구현하였다. 개발된 탐지장치는 방사선원의 방향과 거리를 실시간으로 탐지하기 위한 것으로서 ^{60}Co 감마 방사선장 실증시험에서 방사선원의 방향 및 거리를 비교적 정확히 탐지함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국원자력연구소의 자체연구개발사업의 지원으로 이루어졌습니다.

참고 문헌

- [1] G. Harding, "On the sensitivity and application possibilities of a novel Compton scatter imaging system," IEEE Trans, Nucl. Sci., vol. 29, pp 1260-1265, 1982.
- [2] A. M. Chugg and G. R. Hopkinson, "A new approach to modeling radiation noise in CCDs," IEEE Trans, Nucl. Sci., vol. 45, pp 1518-1523, 1998.
- [3] T. S. Lomheim et al., "Imaging charge-couples device(CCD) transient response to 17 and 50MeV proton and heavy-ion irradiation," IEEE Trans, Nucl. Sci., vol. 37, pp 1876-1885, 1999