Proceedings of the 11th
KACC, October 1996

방사선 분포 모니터링 시스템

Radiation Level Distribution Monitoring System

*최 영 수, 박 순 용, 이 용 범, 이 종 민
한국원자력연구소 로보트기반기술개발팀

Abstracts Radiation monitoring system is needed at nuclear power plant and nuclear facility. Mnual survey techniques are commonly used, but they are time consuming and somewhat inaccurate. Automatic radiation surveys are very important because it provides significant savings in men-rem and wages. Unmanned, remote automatic radiation measurement system should be small and light-weighted in order to mount on robotic system. The system we have developed consists of detection parts, signal processing part, interface, and software part. Position information is provided by using of a collimator. The measurement process is achived by the scanning of detector and image processing techniques are used to display radiation levels. We designed collimators, detectors, signal processing circuit, and constructed prototype system. The goal of this system is the mapping of camera image and radiation level distribution.

Keywords radiation, robotic system, collimator, detector, image mapping

1. 서 론

원자력, 의료, 비파괴검사 등 방사선 관련 산업분야의 수요 증대에 따라 방사선에 대한 선량 평가 및 방사선 방호의 중요성이 날로 증가하고 있다. 특히 원자력 발전의 경우, 보다 안전하고 효율적인 운전을 위해서는 주요시설의 점검 및 보수작업이 정기적으로 이루어져야 하며, 이러한 작업의 대부분은 작업자들이 방사선에 노출된 상태에서 수행되기 때문에 방사선 피폭에 대한 안전성이 고려되어야 한다. 기존의 방사선준위 측정 방법은 기술자가 장비를 들고 다니면서 각 지점마다 방사선준위를 측정하는데, 이 방법은 각 위치에 대한 방사선준위를 정확하게 매핑하는것이 어렵고 작업자의 방사선 피폭 가능성이 높다. 방사선에 대한 작업자의 노출을 줄이고, 작업을 안전하게 수행하기 위해서는 이동기능과 작업현장의 방사선준위를 무인, 원격으로 탐지할 수 있는 보다 손쉬운 방사선분포 측정기능이 필요하다[1]. 로보트에 탑재된 방사선준위 분포 모니터링 시스템은 무인, 원격으로 작업현장을 이동하면서 방사선 준위를 측정하고, 센서로부터 감지된 신호를 2차원 영상형태로 나타냄으로써 안전하고 편리하게 방사선준위 분포를 관측할수 있어 작업자에 대한 방사선 피폭 부담을 줄여주고 효율적인 작업을 가능케 해준다.

본 논문에서는 작업자의 방사선 피폭량 감소와 방사선 관련 시설 운용의 안전성 향상을 위해 이동로보트 탑재형 무인, 원격 2차원 방사선준위 분포 모니터링 시스템을 개발하였다. NaI(Tl) 섬광체와 광전증배관을 결합한 감지기 시스템을 구성하여 이에 따른 차폐체 및 collimator의 최적화 기술을 개발하였으며 로보트 탑재를 고려하여 소형, 경량 및 저소비 전력형의 신호처리계를 설계, 제작하였다. 그리고 시스템의 특성을 조사함으로써 고준위 방사선장에서 방사선 준위 분포 측정용 감지기로서의 실용 가능성을 조사하였다. 센서로부터 측정된 방사선 준위 분포를 매핑하여 방사선정보를 2차원 영상화함으로써 작업자에게 보다 현실감있는 정보를 접할수 있게 해준다.

2. 방사선 준위 분포 모니터링 시스템의 구성

방사선준위 분포 모니터링 시스템의 구성은 그림 1과 같이 collimator, 감지센서부, scanner, 방사선 신호처리기, 제어용 인터페이스부, 이동로보트부 및 소프트웨어로 이루어지며, 감지기의 각 부분은 로보트 탑재를 위하여 소형화 및 소비전력의 최소화를 고려하여 설계하였다.

일반적으로 입사된 방사선의 위치를 검출하는데 사용되는 센서로는 기체형의 위치센서, 반도체 센서 등이 있으나, 본 논문에서는 검출효율이 높고 기계적 진동에 강한 섬광체를 이용한 방사선 준위 분포 감지 시스템을 개발하였는데 실제의 영상과 방사선 분포 영상의 비교 및 분석의 정확성을 위하여 collimator 및 차폐체를 최적화하는 조건으로 제작하였다. 이때 collimator는 방사선에 대한 검출효율 및 방사선 위치 분해능을 상호 고려하여 직경, 길이 및 형태를 결정하였다. 또한, 신호처리기는 효율적인 신호처리를 위하여 광전증배관과 전치증폭기를 통하여 입력

된 신호를 주증폭기로 정형한 후 ADC에 입력하고, 개개의 위치 정보를 디지탈 신호로 변환시켜 버퍼 메모리에 저장하도록 설계하였다. 개별적인 위치 정보의 처리와 시스템의 각 유닛을 컴퓨터로 제어하기 위하여 인터페이스 유닛을 제작하였다. 이렇게 구성된 시스템을 사용하여 실제로 고준위 방사선장에서 방사선 준위 분포를 측정함으로써 방사선 준위 분포 측정 감지기로서의 가능성을 조사하였다.

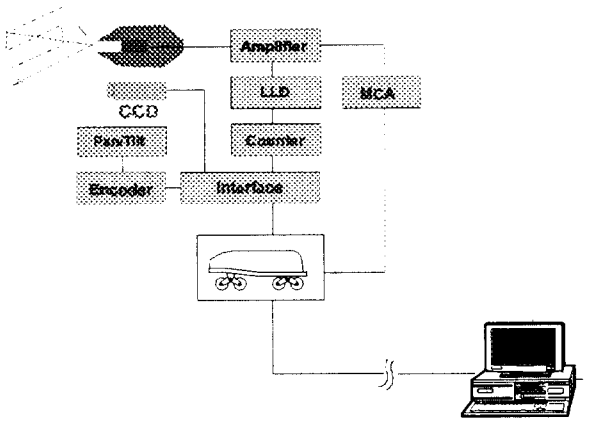

그림 1. 방사선 모니터링 시스템의 블록 다이어그램

2.1 감지기 및 차폐체의 설계

입사한 감마선을 검출하기 위한 검출기는 로보트 탑재시에 발생할 수 있는 기계적인 진동이나 충격을 고려하여 scintillation counter를 선택하였으며, 그에 따른 광전변환소자로서는 1차적으로는 PM tube를 사용하여 신호처리부의 설계와 제작에 따른 각부의 전기적 특성과 아울러 collimator 및 shield의 최적화 조건을 조사하였다. 검출기의 주변을 둘러싼 shield는 자연방사능에 의한 차폐능력이 우수한 물질을 사용하여야 하며, 특히 중량과 부피를 고려하여 최적의 차폐능력을 지니되 경량화되어야 한다. 그림 2는 collimator 및 shield의 최적화를 위하여 제작된 scintillation counter의 단면도로서 중량을 고려하여 전방부의 차폐는 collimator의 성능을 저하시키지 않는 범위내에서 원추형태로 설계하였고 collimator의 교환이 가능하도록 설계하였으며 입사창은 X-선에 의한 영향을 줄이기 위하여 Ni filter를 사용하였다. 그러나 검출기 측면 차폐체의 두께가 10mm 정도밖에 되지 않아 검출기의 중심축에서 25도 이상의 각도에 방사선원이 존재할 경우 측면으로 투과하는 방사선의 수가 증가하였다. 따라서 최종적인 검출기의 설계는 차폐체의 두께를 증가시키되 로봇탑재를 고려한 중량의 최소화와 그에 따른 shield 등을 고려하여 자연방사성핵종에 의하여 방출되는 감마선의 에너지중 가장 계수율이 높고 또한 일반적인 감마선 에너지의 중간정도의 에너지를 지닌 K-40의 1.44 MeV을 고려하여 Co-60을 기준으로 shield를 설계하였다. 외부의 shield는 각 방향에서 최소 Co-60의 1.33 MeV에 대한 1/10가층인 40mm가 되도록 하였으며, 각 모서리부분은 중량을 줄이기 위하여 원추기둥형태로 모따기를 하였다. 특히 PM tube의 사용에 따른 중량문제를 해결하기 위해 CsI(Tl) scintillator와 PIN photodiode를 결합하여 저준위검출을 위한 차폐체의 중량을 줄이도록 설계한다.

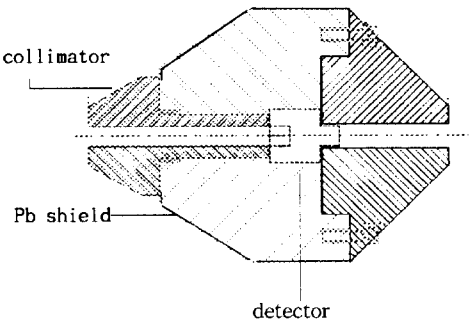

그림 2. 감지기 단면도

2.2 Collimator의 설계

카메라에서의 렌즈와 같이 감지기에 있어서 중요한 요소가 되는 collimator는 감마선의 흡수가 좋은 금, 텅스텐 등의 재질을 사용할 수도 있으나, 본 논문에서는 비교적 가공이 용이하고 차폐력이 뛰어나며 가격이 저렴한 납을 사용하였다. 경우에 따라서 강도를 향상하기 위하여 antimony나 bismuth등이 수% 섞여질 수도 있다. 그리고 collimator의 성능은 hole의 수, 직경, 길이, 초점거리 및 격벽의 두께 등에 의하여 결정되는데 일반적으로 hole의 크기가 작고 수가 많으면 분해능이 좋아지며 hole이 큰 것은 검출효율이 좋다. 또한 collimator의 길이가 너무 짧으면 지향성이 나빠져 분해능이 저하된다. 따라서 collimator는 위치분해능 및 검출효율의 특성을 적절히 고려하여 직경이나 길이 등을 결정하여야 한다. 감지기와 방사선원과의 거리 및 FWHM에 따른 view angle을 계산하여 적절한 직경이 되게 설계하는데 view angle을 구하는 식은 아래와 같다.

$$\theta = \tan^{-1}\frac{FWHM}{\text{선원거리}}$$

여기서 θ는 view angle이며, FWHM(Full Width Half Maximum)은 선원을 직각방향으로 측정할 때 최고 계수율의 절반에 해당하는 곡선의 폭을 나타내며 분해능의 지표가 된다. view angle이 작아지면 탐지기의 스캔에 따른 공간분해능이 좋아지고 view angle이 커지면 공간분해능이 저하된다. 방사선원과 감지기 사이의 거리를 변화시키지 않고 직경만 변화시켰을 때, collimator의 직경(d)이 증가할수록 FWHM은 증가하고 view angle은 커지게 되어 분해능은 저하된다. 그리고, 선원거리를 증가시키면서 동일한 공간분해능을 얻고자 한다면 view angle은 작아야 하고 아울러 직경도 작아져야 한다. 그림 3은 선원간 거리에 따른 감지기의 공간분해능을 나타내는데, 선원간의 거리가 10cm이상일 때 다른 방사선원으로 구별해낼수 있다. 즉, 감지기

와 선원과의 거리가 1m일때 10cm 이내의 방사선원이 하나의 레벨로 나타난다. 그림 4는 스캔각도의 변화에 대한 계수치를 직경의 변화에 대해 나타내었는데, 직경이 작아질수록 검출감도가 저하됨을 볼 수 있고 특히 직경이 2mm 이하인 경우 백그라운드의 영향에 따른 오차를 줄이기 위해서는 측정시간이 길어져 본 연구의 조건에 맞지 않음을 알 수 있었다. 따라서 최적의 collimator는 일차적으로 요구되는 분해능을 정하여 직경대 길이의 비(d/L)를 얻은 후 검출한계를 정하여야 한다.

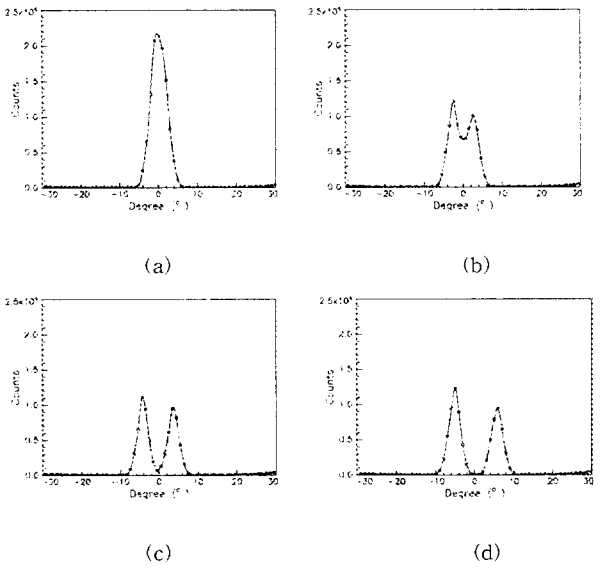

그림 3. 선원간 거리에 따른 분해능
(a) 5cm (b) 10cm (c) 15cm (d)20cm

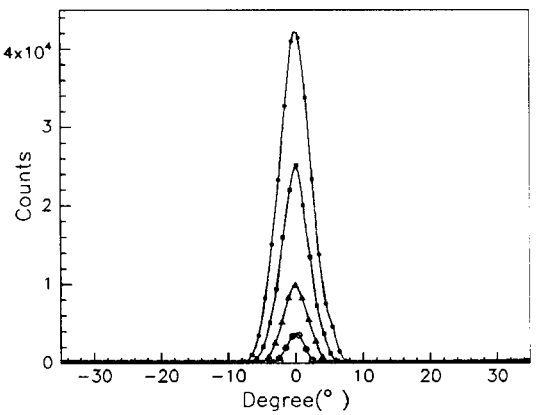

그림 4. 직경에 따른 스캔각도와 계수치의 관계

2.3 신호처리기의 설계

검출기에 의한 신호처리회로와 아울러 각도계의 팬/틸트 제어를 위한 전자회로는 로보트 탑재를 고려하여 중량 및 소비전력의 최소화를 기준으로 하여 설계하였다.

전치증폭기는 PM tube의 R-C divider와 최대한 가까이 설치하는 것이 좋으므로 다른 신호처리기와는 별개로 제작하여 검출부에 탑재하도록 설계하였다. 또한 그에 따른 소형화 및 전력손실의 최소화를 위하여 operational amplifier를 사용하여 전하감응형의 전치증폭회로를 구성하였다. 전치증폭기를 통하여 출력되는 신호는 입상시간이 짧은 반면(~10 ns) 하강시간이 매우 길어(~100 ns) 신호의 pile up이 일어나 실계수치를 감소시킴으로 정형증폭기를 이용하여 신호의 모양 및 크기를 변화시켜 주어야 한다. 정형증폭기는 pole-zero cancellation부와 CR-RC 정형 및 active filter로 구성되어 있다. 정형증폭기의 출력신호를 TTL레벨로 변환하여 counter에 입력시키기 위한 NE-521을 이용한 window discriminator를 설계하였다. 입사신호의 크기에 무관하게 일정한 폭의 TTL 신호를 출력하기 위하여 mono-stable multivibrator(74LS123)를 이용하여 출력 펄스폭을 1 μs로 하여 counter에 입력하도록 하였다. counter는 최소한의 IC로서 신호처리 간편하고 2^{16} 까지 계수가 가능하도록 하기위하여 binary 8-bit counter IC인 74LS590을 이용하였다.

2.4 영상처리

일반적으로 영상에는 많은 종류의 잡음이 포함되어 있으므로 영상의 특징을 획득하기전에 이러한 잡음을 제거해줄 필요가 있다. 잡음발생의 모델을 알고 있을때에는 그 모델에 따른 필터를 설계하면 효과적인 잡음제거를 할 수 있으나 대부분의 경우 잡음 발생의 메카니즘을 알 수 없는 경우가 많고, 또 그 메카니즘을 알고 있더라도 수식적으로 모델화하기 힘든 경우가 많이 있다. 따라서 이러한 경우는 잡음의 일반적인 성질을 이용하여 잡음을 제거하는 평활화 수법이 많이 쓰인다[2,3]. 평활화된 영상으로부터 특징을 획득하기 위해 Kirsch operator를 사용하여 경계선을 구하였다[4,5]. 이 방법은 미분조작을 하지않고 경계를 검출할 수 있는 방법으로써 계산량을 줄일수 있어 빠른 속도의 영상처리를 구현할 수 있다. 그림 5는 원영상, 평활화된 영상, kirsch operator로 처리한 영상 및 3차원으로 재구성한 그림이다.

3. 이동로보트

이동로보트는 사람의 접근이 어려운 고방사선 구역등과 같은 특수작업환경에서의 방사선준위 측정을 위해 오퍼레이터에 의해 원격조작 되어지거나 계획된 경로나 위치로 자율주행하는 기능을 가지고 있다. 이동로보트는 바퀴의 회전속도차에 의해 조향이 가능하도록 설계되어 있으며 자율주행시 장애물회피를 위해 초음파 센서를 사용하고 있다. 로보트의 바퀴는 서보모터로 구동되며, 모터에는 회전속도 및 거리를 측정하는 encoder가 장착되어 있고, 각각의 모터들은 24V 밧데리 전원장치에 의해 전력을 공급받는다. 그리고, 로보트가 움직일 때 발생할 수 있는 진동 및 노이즈 제거를 위해 컴퓨터제어부가 내장되어있다. 원격지의 주

컴퓨터는 로보트에서 송신된 정보를 이용하여 장애물회피등 이동 제어기능과 방사선센싱 정보의 처리기능을 총괄하게 된다.

4. 실험 및 결과

실제의 영상과 방사선분포영상의 비교 및 분석의 정확성을 위하여 collimator의 field of view를 최적화할 수 있는 조건을 결정하기 위하여 NaI(T1) scintillation counter와 그에 따른 여러가지 구조변수의 collimator를 제작하여 검출감도 및 위치분해능 등의 위치검출특성을 조사하였다. 그 결과 collimator의 직경이 8mm 일때 위치분해능 및 검출효율이 적절하게 나타났다.

한편 효율적인 신호처리와 로보트탑재를 위하여 각 신호처리계를 소형 및 저전력형으로 설계하였으며 감지기로부터의 출력신호를 operational amplifier를 이용하여 제작한 전치증폭기와 CR-RC정형부 및 pole-zero cancellation 기능과 active filter로 구성된 주증폭기를 이용하여 파형을 증폭 및 정형한 후 고 속의 비교기인 NE512와 RS 플립플롭으로 구성된 레벨 분별기로서 잡음과 신호를 구분, TTL 레벨로 변환하여 16비트 바이너리 카운터에 입력시켰다. 특히 개별적인 위치 및 방사선강도 등의 정보처리와 시스템의 각 유닛을 컴퓨터로서 제어하기 위한 인터페이스부는 범용성을 고려하여 PPI(8255)와 어드레스 디코더로서 설계하였다. 그리고 각 신호처리부의 동작특성을 살펴보기 위하여 상용의 모듈들과 상호 비교하였다.

제작된 감지기와 신호처리시스템의 영상획득 및 신호처리 특성을 조사하기 위하여 최적 조건의 collimator를 이용한 방사선 영상을 획득하여 실제의 가시영상과 비교하여 봄으로써 시스템의 안정성을 조사하였다.

같은 방사능의 Cs-137에 대해서 직경 8mm의 collimator를 사용하였을 때 1m에서 10cm이내의 위치 분해능을 나타내었고 검출효율도 비교적 좋았다. 또한 여러종류의 방사성 선원이 존재할때의 검출영상을 살펴 보았다. 여기서 정확한 영상을 얻기 위해서는 감마선 에너지에 대한 위치분해능의 보정이 필요함을 알 수 있었다. 그리고 거의 같은 방사능의 방사성 선원을 감지기에서 서로 다른 거리에 두고 측정한 결과 거리에 대한 보정도 있어야함을 알았다.

이상의 몇가지 보정으로 보다 정확한 방사선 준위 분포 영상을 얻을 수 있을 것이다.

5. 결 론

방사선관련 종사자의 방사선 피폭량을 줄이고, 작업의 안전성을 향상시키기 위해 로보트 탑재 가능한 무인, 원격 2차원 방사선분포 검출 시스템을 개발하고 이에 따른 collimator 및 차폐체의 최적화와 검출부의 소형, 경량화를 위한 연구를 수행하였다. 그리고 방사선 영상획득 실험을 통해 보다 쉽게 방사선 분포를 모니터링 할 수 있는 장비를 개발하였다.

방사선 센서와 컴퓨터의 접속을 위한 제어용 인터페이스 유닛의 제작에 있어 범용성을 고려하였고 저준위 방사선의 측정과 검출부의 중량을 상호 고려하여 차폐체를 최적화하였다. 또한 방사선 준위 분포의 원격측정을 위하여 스캐닝, 데이터의 입출력 제어 등 모든 제어를 인터페이스를 통하여 컴퓨터에서 조정할 수 있도록 설계, 제작하였다.

방사선 준위 분포 측정 모니터링 시스템을 로보트에 탑재하기 위해서는 소형, 경량 및 저소비 전력화가 실현되어야 한다. 그리고, 정확하고 쉽게 모니터링 할 수 있는 장비를 개발함으로써 안전성 향상에도 기여할 것이다. 앞으로 CsI(Tl) 섬광체에 PIN Si photodiode를 사용하여 감지기의 크기를 최소화하여 전체 시스템의 중량은 줄이되 차폐는 증가시키고 시스템의 정밀도와 외부에 대한 안정성을 향상시켜야 할 것이다. 그리고, 카메라로 획득한 실 영상과 방사선 영상을 매핑하여 보다 손쉽게 표현하는 방법 등에 대해서도 연구가 진행될 것이다.

참고문헌

[1] R. Gould, J. E. Tarpinian, E. S. Kenney, *"An automated system for gamma radiation field mapping,"* Nuclear Instruments and Methodw in Physics Research A299, pp. 538-543, 1990

[2] K. R. Castleman, *Digital Image Processing*, Prentice Hall, 1979

[3] R. O. Duda, Peter E. Hart, *Pattern Classification and Scene Analysis*, Wiley-interscience publication,1973

[4] D. H. Ballard, C. M. Brown, *Computer Vision*, Prentice Hall, 1982

[5] R. M. Haralick, L. G. Shapiro, *Computer and Robot vision*, Addison-Wesley, 1992

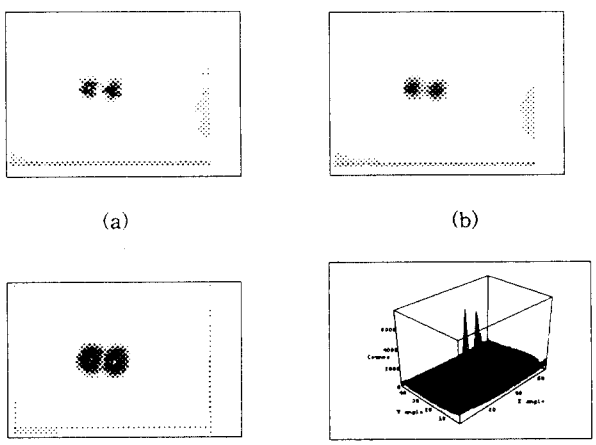

그림 5. 두 개의 방사선원에 대한 영상
(a) 원영상 (b) 평활화된 영상
(c) kirsch operator 처리 영상
(d) 3차원 재구성 영상