*Journal of Radiation Industry* 6 (3) : 231~237 (2012)

# 이동 형 산업용 단층측정 장치를 위한 감마선 검출시스템 개발

김 종 범* · 정 성 희 · 문 진 호

한국원자력연구원

# Development of Measurement System for Industrial Transportable Gamma Ray CT

Jong-Bum Kim*, Sung-Hee Jung and Jin-Ho Moon

*Radioisotope Research and Development Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea*

**Abstract - This paper introduces a gamma-ray measurement system for a transportable tomography which is applicable for an industrial process diagnosis. The gamma-ray measurement system consists of pulse mode operating 72 channel CsI detectors, main AMP-pulse shaper, single channel analyzer, counter and control PC. The CsI crystal is coupled with a PIN diode which is connected to an amplifier and pulse shaper. For a compact design, the amplifier and pulse shaping circuit are included in a single package. 36 sets of CsI detectors are connected to a multi-channel counter through single channel analyzers. A computer controls and collects data from two multi-channel counters. This configuration results in 72 channel counting system in total. The CT rotator and radiation measurement system are controlled by a PC with LabVIEW program. Tomographic data were measured for a phantom by the measurement system and transportable gamma-ray CT. From the experimental data image reconstructions were performed by ML-EM algorithm. The result showed that the CsI detector system can be a suitable component for transportable gamma-ray CT system.**

**Key words : Gamma-ray measurement, CsI, Tomography, Process diagnosis**

## 서 론

감마선의 경우 방사선 발생장치가 필요 없는 동시에 높은 에너지를 갖는 장점으로 인해 산업공정 진단을 위한 장치에 널리 사용되고 있다(Charlton 1986; Kim *et al.* 2006; Jung *et al.* 2010). 또한 감마선을 이용한 단층 측정 장치를 산업공정 진단 적용하기 위한 여러 연구 사례가 보고되고 있다(Kumar *et al.* 1995; Legoupil 1997; Boyer *et al.* 2002; Johansen 2005; IAEA 2008; Kim *et al.* 2011). 본 논문은 이동 형 산업용 감마선 단층측정 장치에 적용하기 위한 다중 채널 감마선 검출 시스템 개발에 관한 것으로서 특히 운전 중인 배관 등 분리가 불가능한 피검 체를 위한 이동 형 감마선 단층 측정 장치에 적용하기 위한 것이다. 감마선 방출 동위원소의 경우 X-선 발생장치에 비해 다루기가 용이하기 때문에 플랜트 검사 분야에서 널리 이용되고 있다. 그러나 산업 게이지용 감

* Corresponding author: Jong-Bum Kim, Tel. +82-42-868-8050, Fax. +82-42-862-6980, E-mail. jong@kaeri.re.kr

마선원의 단점 중의 하나는 X-선원에 비해 방사선 플럭스가 상대적으로 낮다는데 있다. Sibert (2004)의 계산에 의하면 관 전압 120 kV의 의료용 CT의 경우 광원에서 50 cm 떨어진 거리에서 관 전류 mA 당 $6.7 \times 10^6$개/$mm^2$-sec의 광자를 방출한다. 이것을 동위원소로 환산하게 되면 감마선 방출 율이 100%인 경우 mA당 560 Ci의 방사능을 갖게 된다. 산업용 엑스선 또는 의료용 엑스선 CT의 경우 관 전류가 수 mA에서 수백 mA에 이르기 때문에 소 출력 엑스선 발생장치와 비슷한 수준의 방사능이라도 실외에서 취급하기 어려운 수준으로 높은 방사능값이 된다 (Sibert 2004; Fischer *et al.* 2008). 산업용 라디오그라피에 사용되는 동위원소의 경우 수십 Ci 수준이며 필름이나 imaging plate에 대해 수십 분정도의 장시간 노출이 필요하다. 산업용 게이지용이나 감마 타워스캔 등의 경우 주로 수백 mCi 이하의 방사능이 사용되며 섬광형 검출기를 사용하여 수초 이하의 계측을 한다 (Charlton 1986; Kim *et al.* 2006). 고 해상도의 엑스선 CT 검출기의 경우 이와 같이 게이지용 감마선원에 비해 높은 플럭스의 환경에서 동작하기 때문에 게이지용 감마선원을 사용하여 고해상도 엑스선 CT의 검출 시스템을 이용하여 측정하는 경우 낮은 감도로 인해 측정이 어렵게 된다. 고해상도 측정을 위해서는 작은 크기의 검출기를 사용하는 대신 높은 플럭스의 광자가 요구된다. 낮은 플럭스의 광자와 작은 크기의 검출기 조합은 높은 통계오차로 신호대 노이즈 비가 낮은 데이터를 얻게 되며 높은 플럭스에 대해 큰 크기의 섬광체를 사용하게 되면 포화로 인해 신호처리가 어렵게 된다. Fig. 1은 검출기 크기에 따른 감도와 해상도의 관계를 보여주기 위한 것으로 X-선 CT의 경우 고 해상도 검출기에 높은 플럭스의 조합인 반면 감마선 CT의 경우 저 해상도 검출기와 낮은 플럭스 방사선의 조합으로 볼 수 있다.

높은 플럭스의 경우 전류모드 동작을 낮은 플럭스의 경우 펄스모드 동작을 하도록 계측기를 구성하는 것이 일반적이다. 이와 같은 이유로 산업공정 진단을 위한 감마선 CT의 경우 낮은 플럭스 광자에 대해 펄스모드로 동작하는 섬광 형 검출기를 사용하는 것이 주류를 이루고 있다. 산업공정 진단 단층 측정 장치에 사용되는 감마선 검출기의 예를 보면 Boyer *et al.* (2002)는 Cs-137 (500 mCi)에 1 cm 조준기를 장착한 32개의 1 inch BGO 검출기 시스템을 사용하였고 Bieberle *et al.* (2007)는 320개의 2 mm × 8 mm LYSO 검출기에 Cs-137 (5 Ci)을 사용하였다. 이들 사례에서 펄스모드로 동작하기 위해서 검출기 불감시간으로 인한 포화를 피하기 위해 검출기에 대해 공기 중 측정값으로 대략 50,000 cps 이하로 일정 계수율 이하로 유지하고 있다. Boyer (2002)와 Kumar (1995)는 전용 검출 시스템 대신 상용 감마선 검출 시스템을 감마선 CT에 적용하였고 장치의 소형화에 큰 의미를 두지 않았다. Bieberle (2007)의 경우 펄스모드로 동작하는 시스템으로는 비교적 높은 해상도의 시스템을 개발하였으나 APD (Avalanche Photo diode) 사용으로 인해 냉매를 이용한 냉각 시스템을 사용하기 때문이 이동 형 장치 대신 실험실 전용 장치로 사용하고 있다 (Hampel *et al.* 2008).

본 논문에서는 이동성과 소형화를 고려하여 기존의 연구자들이 적용하지 않은 펄스모드로 동작되는 72개의 CsI 검출기 시스템을 시도해보았다. CsI 검출기 출력은 단 채널 분석기로 연결되고, 단 채널 분석기 모듈은 12채널이 하나의 단위로 구성되어 있으며 12개의 CsI 검출기가 연결된다. 12채널로 단위로 구성된 3 set의 단 채널 분석기 모듈이 36채널 계수기로 연결된다. 2개의 36채널 계수기가 컴퓨터로 연결되어 전체적으로 72채널이 구성된다.

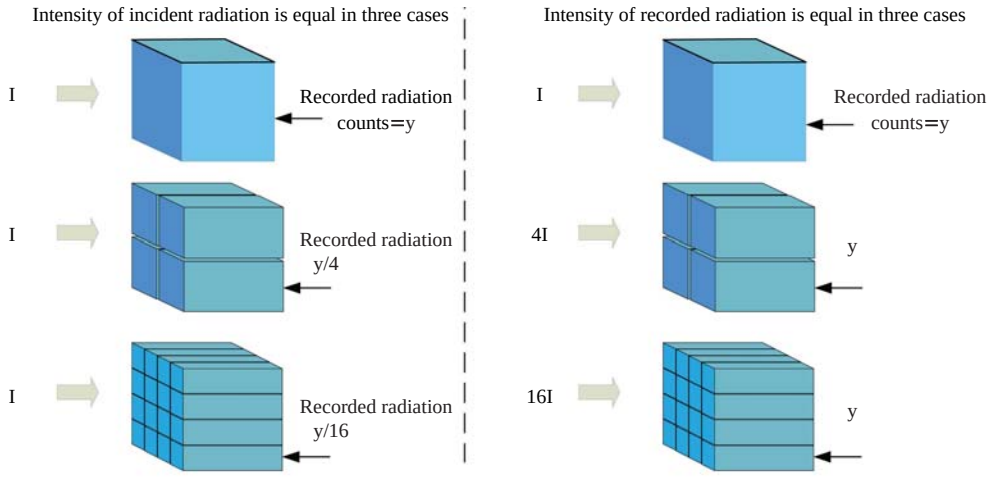



**Fig. 1.** Relationship of sensitivity and resolution.

컴퓨터는 데이터 기록장치의 역할을 하는 동시에 CT의 회전자를 제어한다. 제어 프로그램은 LabVIEW8.0을 이용하여 구성하였으며, CT의 회전자를 한 스텝 이동시킨 후 두 set의 계수 장치로부터 계수 데이터를 입력받아 위치 데이터와 함께 컴퓨터에 저장하도록 동작된다.

## 재료 및 방법

### 1. 방사선 센서 부

방사선 센서는 12 mm × 12 mm × 20 mm의 CsI 섬광체에 Hamamatsu사의 S8650 PIN 광 다이오드를 수광 소자로 사용하였다. PIN 다이오드가 결합된 CsI 검출기는 저 전압으로 동작되고 소형화가 가능한 장점이 있다. PIN 다이오드의 출력은 전치 증폭기를 거쳐 주 증폭기와 pulse shaper로 연결된다. 부피를 줄이기 위해 CsI 섬광체, PIN 다이오드, 전치 증폭기, 주 증폭기와 pulse shaper 회로는 한 개의 단위로 구성되었다. Fig. 2(a)는 제작된 CsI 검출기에 대한 사진으로서 이와 같은 검출기 72개로 전체 시스템이 구성된다. Fig. 2(b)는 이를 이용하여 측정된 에너지 스펙트럼을 보여주고 있다. CsI 검출기의 에너지 해상도는 Co-60과 Cs-137에 대해 각각 6%, 11.6% 수준으로 측정되었다.

### 2. 단 채널 분석기

단 채널 분석기는 lower level discriminator (LLD)와 upper level discriminator (ULD) 사이의 펄스를 선택하기 위

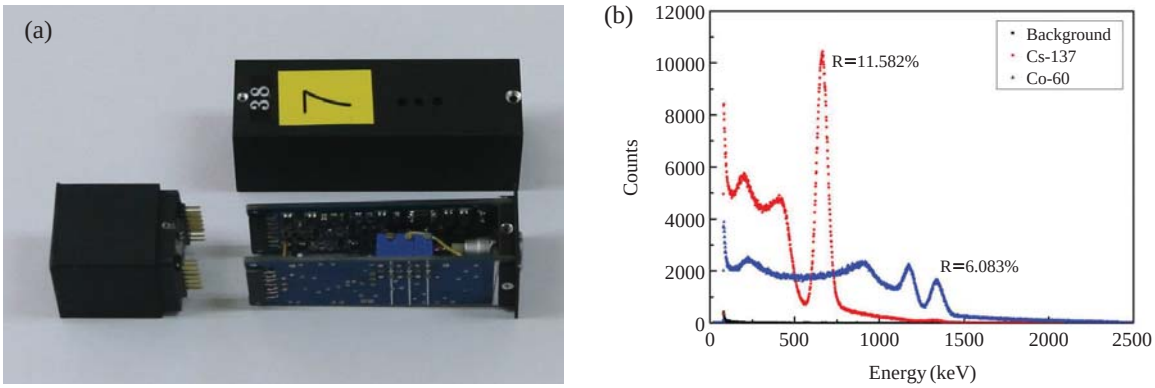



**Fig. 2.** CsI detector for the portable gamma-ray tomography and its spectrum.

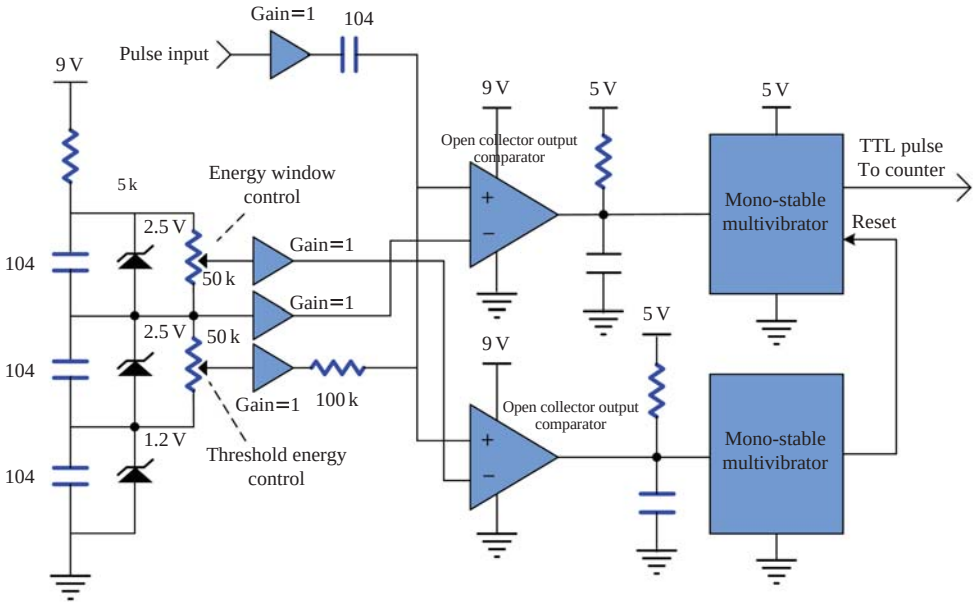
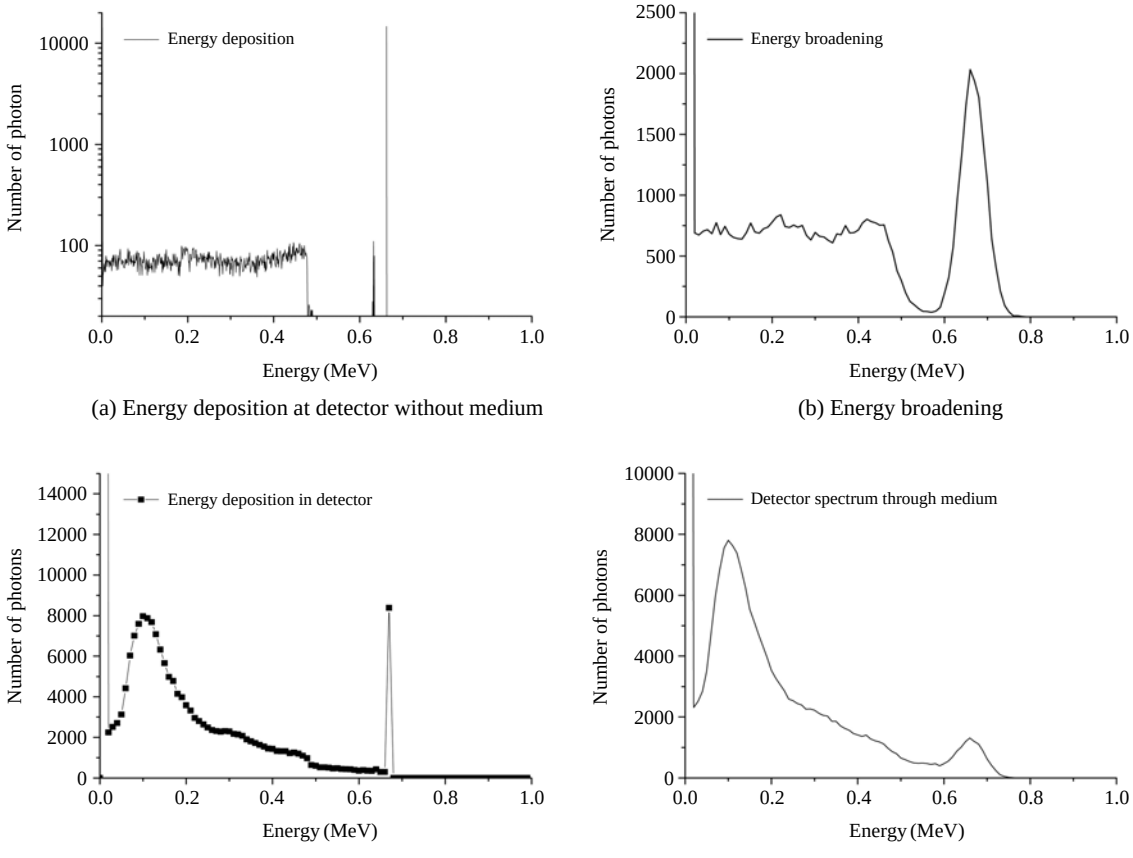



**Fig. 3.** Single Channel Analyzer.

한 것으로서 펄스모드 계수 시스템의 방사선 에너지 선별계측을 위해 필요한 요소이다. Fig. 3은 본 시스템에 설계된 단 채널 분석기의 개략적인 회로도를 보여주고 있다. Fig. 3은 한 채널당 포함되는 회로도로서 voltage reference 다이오드의 출력을 버퍼를 통하여 비교기 2개에 입력되고 단 안정 멀티바이브레이터(Mono-stable multivibrator)에 연결되도록 되어있다.

Cs-137 또는 Co-60을 선원으로 사용하는 감마선 CT는 콤프톤 산란이 우세한 영역에서 계측이 이루어진다. 따라서 산란 방사선의 영향을 줄이기 위해서는 방사선 에너지 영역을 선별하여 계측할 필요가 있다. 전류모드의 계측에서는 에너지에 대한 threshold를 설정하기 어렵지만 펄스모드 계수에서는 에너지 선별 계측이 가능하다. 펄스모드에서 광전피크에 대한 에너지 선별 계측 시에는 방사선 검출기의 pulse shaper 출력 신호 중 다수의 계측 값이 threshold에 의해 제외된다. 측정 매질 내에서 산란되는 방사선과, 매질과 충돌하지 않은 투과 방사선이 검출기 내에서 부분 반응하여 생긴 신호와 특별이 구별할 수 있는 방법이 없어 결과적으로 매질 내의 산란 방사선 제거를 위해 에너지 선별 계측으로 하는 경우 유효한 계수 값이 줄어들게 된다. 또 다른 문제점은 펄스모드 계측 값이 큰 에너지의 펄스와 낮은 에너지의 펄스를 동등하게 계수한다는 점이다. Photo-peak만 계수 시에는 큰 문제를 발생시키지 않으나 전자 잡음만 제거하는 낮은 LLD 값을 설정한 경우 전류모드 방식에 비해 SPF (scatter to photo-peak factor) 값을 낮추는 역할을 하여 결과적으로 산란방사선의 영향을 과대평가하게 된다. 이를 정량적으로 분석하기 위해 MCNPX를 이용하여 매질을 통과하여 CsI에 입사하는 감마선의 스펙트럼을 분석해 보았다. Fig. 4(a)는 선원과 검출기 사이가 빈 공간인 경우 CsI 검출기에 전달되는 에너지 스펙트럼이며 (b)는 제한된 검출기 해상도에 의해 energy broadening이 된 경우 즉 실제계측 스펙트럼과 유사한 경우이다. (c)는 0.662 MeV 감마선이 20 cm의 콘크리트를 통과하여 검출기에 흡수되는 에너지 스펙트럼이고 (d)는 CsI 검출기의 11.6%의 해상도에 의한 broadening된 스펙트럼이다.

Fig. 4(b)의 계측에서 전 에너지 영역 대비 광전피크 영역 비(photo-fraction)는 약 30.4%이다. 그리고 (d)의




(a) Energy deposition at detector without medium

(b) Energy broadening

(c) Energy deposition at detector with medium

(d) Energy broadening

**Fig. 4.** Spectrum analysis by Monte Carlo simulation.

경우 photo-fraction이 6.9%으로 계산되었다. 이에 비해 전류모드로 계측하는 경우에 대해 photo-fraction을 계산하기 위해 (b)와 (d)의 스펙트럼 곡선에 에너지에 대한 가중치를 주어 photo-fraction을 계산하였으며 (b)의 경우 각각 52.8% (d)의 경우 20%로 계산되었다. 본 논문에서의 방사선 계측시스템의 광전피크를 계수 시 대략 전 에너지 계측시의 photo-fraction은 매질에 따라 약 7～30% 수준의 값을 갖게 된다. 펄스모드로 동작하는 감마선 CT에서의 유효 계수 율 감소에 대해서는 추가적인 대책이 필요할 것 같다.

### 3. 72채널 펄스 계수기 및 데이터 기록장치

단 채널 분석기의 출력은 너비가 일정한 단 안정 멀티바이브레이터의 TTL 펄스 출력이다. TTL 펄스 출력을 계수하기 위해 36채널 펄스 계수기를 2세트를 사용하여 72채널을 구성하였다. 36채널 계수장치는 main processor로 ATMEL사의 AT91SAM7X256를 사용하고 계수장치로 XC2V250 FPGA 소자를 사용하였다. AT91SAM7X256은 32 비트의 reduced instruction set computer 기반의 micro-controller이며 USB 단자 및 serial 단자를 기본으로 내장

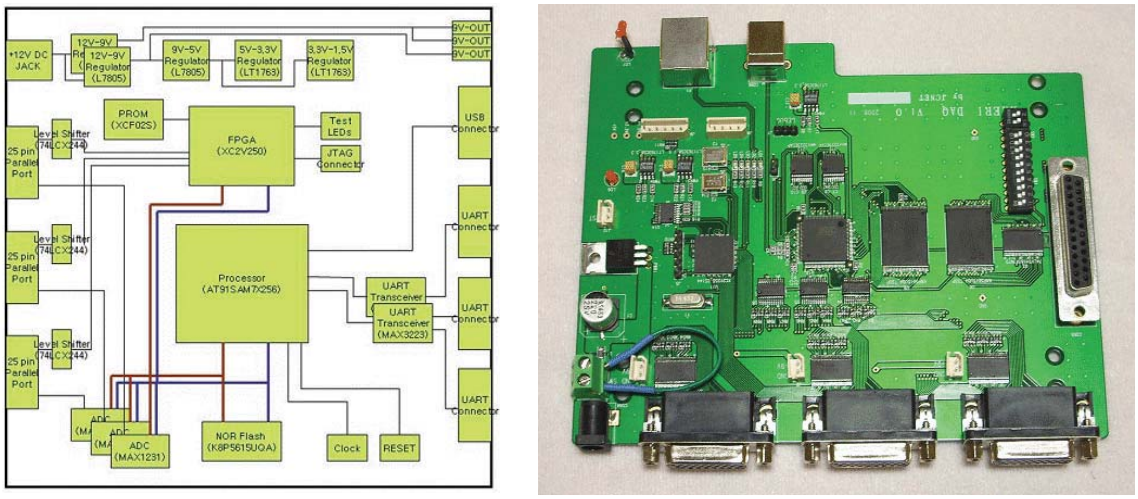



**Fig. 5.** 36 channel pulse counter.

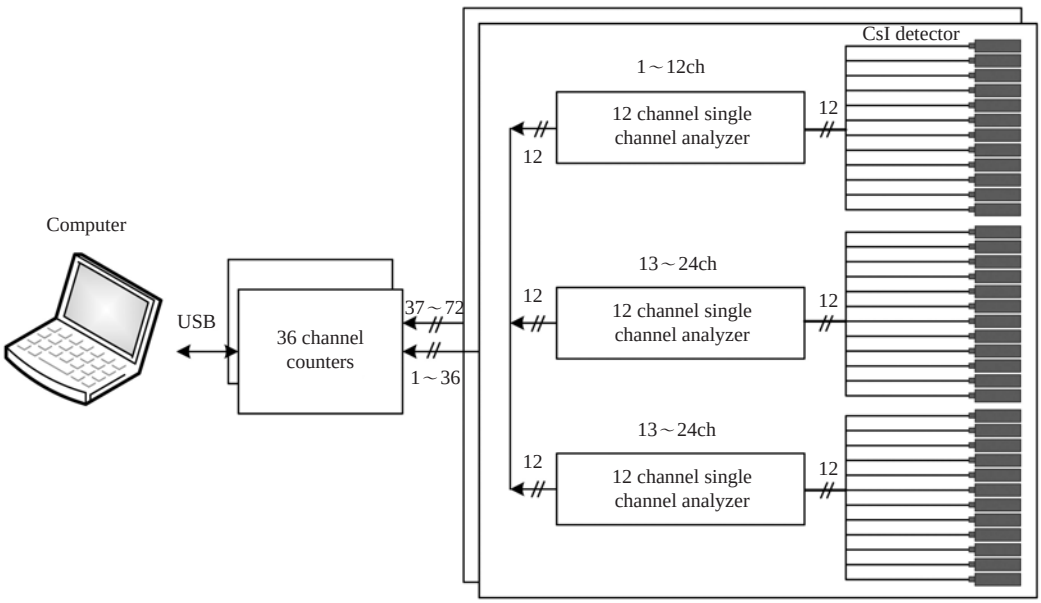



**Fig. 6.** Configuration of measurement system.

하고 있다. XC2V250는 XLINX사의 Field-Programmable Gate Array로 최대 93184개의 레지스터 또는 latch를 구현할 수 있다. 방사선 계수 값은 펄스 계수기로부터 컴퓨터로 전송된다. Fig. 5(a)는 제작된 36채널 펄스 계수 장치의 구조도이며 Fig. 5(b)는 이를 바탕으로 제작된 기판이다.

Fig. 6은 CsI 검출기, 단 채널 분석기, 36채널 계수장치, 제어용 컴퓨터 등으로 구성된 전체 시스템의 구성도이다. Fig. 6에서 단층 측정 장치의 회전자 제어부분은 포함되어 있지 않으며 별도의 통신 채널로 제어된다. 컴퓨터 제어 프로그램에서 projection 값과 계수 시간 등을 설정한 후 회전자와 방사선 계수장치가 연동하여 동작되도록 제어한다.

## 결과 및 논의

Fig. 7은 72채널의 CsI 검출기가 적용된 이동 형 감마선 단층 측정 장치이다. 이동 형 감마선 단층 측정 장치의 세부사항은 Kim *et al.* (2012)의 문헌에 상세히 기술되어 있다. 선원은 20 mCi의 Cs-137을 사용하였으며 직경 7 mm, 길이 10 mm의 텅스텐으로 만들어진 원주형의 팬빔 조준기 내부에 장착된다. 팬빔 조준기의 개방 면은 축 방향으로 6 mm 폭이고, 약 90도의 빔 각도를 가지고 있다. 그리고 5초간 계수 및 128 projection의 경우 전체 측정 시간은 약 15분 정도이다. 조준기 내 선원과 디텍터의 거리가 91 cm에서 공기 중에서 계수 율은 초당 5,000 cps로 측정되었다.

Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)의 팬텀에 대해 256 projection 및 projection 당 5초씩 계수한 값으로 EM 알고리즘(Lange *et al.* 1984)을 이용하여 이미지 복원한 결과이다. 포토 픽 계수의 경우 LLD를 550 keV에 설정하였으며 전 계수의 경우 약 100 keV에서 설정하였다. Fig. 8(c)은 단 채널 분석기의 LLD 값 설정에 따른 결과의 차이를 보여주고 있다. Fig. 8(c)는 photo-peak 계수 시와 전계수시의 차이를 보기 위해 이미지 복원 결과에 대해 수평 slice값을 추출하여 참 값과 비교한 것이다. Photo-peak 계수가 참값에 가까움을 알 수 있다.

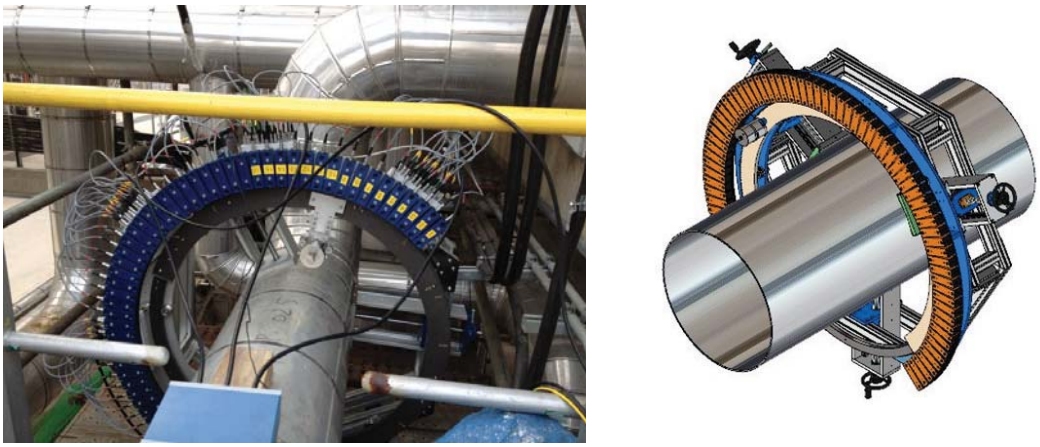
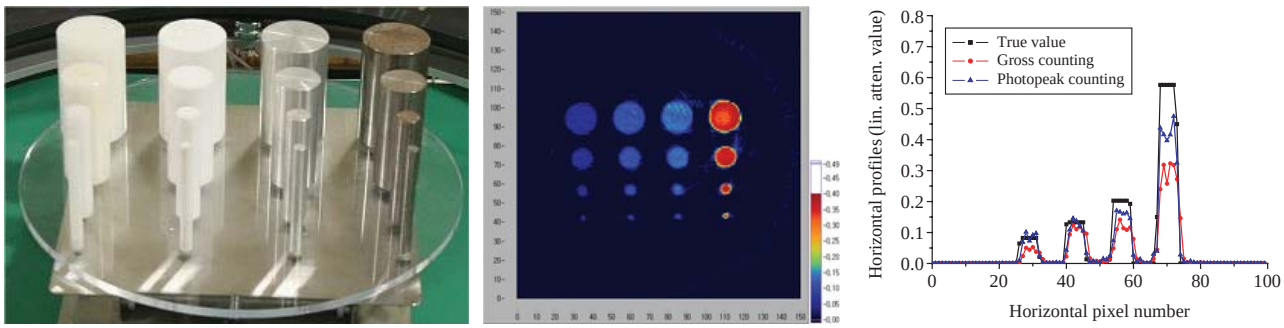


**Fig. 7.** Industrial transportable gamma-ray CT.




(a) (b) (c)

**Fig. 8.** Phantom measurement with 256 projections.

## 결 론

지금까지 이동 형 감마선 단층 측정 장치 적용을 위한 72채널 감마선 검출 시스템 개발에 대해 살펴보았으며, 방사선 검출 시스템을 개발하여 이동 형 감마선 단층 측정 장치에 적용해 보았다. 이를 통하여 CsI 검출기를 채택한 방사선 검출시스템이 이동 형 단층 측정 장치에 적용될 수 있음을 보여 주었다. 감마선 단층 측정 장치에 있어서 현재 해상도는 배관 내 미세한 침착 탐지나 crack 탐지 등을 탐지 할 수 없는 수준이기 때문에 배관의 막힘, vapor trap 등과 같은 저 해상도가 요구되는 탐지에만 적용 가능하다. 산업현장에서 요구되는 다양한 요구에 대한 적용을 위해서는 해상도의 향상이 요구된다. 해상도가 증가 될수록 다양한 분야로 기술적용이 확대될 수 있다. 해상도관련 문제점에 대해서는 더 작은 크기의 검출기를 개발하는 것이 근본적인 해결책이 될 수 있다. 2 mm 해상도를 갖는 FZD의 LYSO system을 사용한 감마선 tomography의 사례 (Bieberle *et al*. 2007)를 검토해 볼 필요가 있으며, position sensitive detector를 본 시스템에 적용해 보는 것 등을 고려해볼 필요가 있다.

## 사 사

본 연구는 교육과학기술부에서 시행하는 원자력연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

Bieberle A, Kronenberg J, Schleicher E and Hampel U. 2007. Design of a high-resolution gamma-ray detector module for tomography applications. *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A.* **572**:668-675.

Boyer C and Fanget B. 2002. Measurement of liquid flow distribution in trickle bed reactor of large diameter with a new gamma-ray tomographic system. *Chem. Eng. J.* **57**: 1079-1089.

Charlton JS. 1986. Radioisotope Techniques for Problem-solving in Industrial Process Plants, Leonard Hill.

Fischer F. Hoppe D. Schleicher E, Mattausch G, Flaske H, Bartel R and Hampel U. 2008. An ultra fast electron beam x-ray tomography scanner. *Meas. Sci. Technol.* **19**:11.

Hampel U, Hoppe D, Bieberle A and Zippe C. 2008. J. Measurement of Fluid Distributions in a Rotating Fluid Coupling Using High Resolution Gamma Ray Tomography. *Fluid Eng.-Trans. ASME*. **130**: 09142-1.

IAEA. 2008. Industrial Gamma Process Tomography. TECDOC-1589.

Johansen GA. 2005. Nuclear tomography methods in industry. *Nucl. Phys. A.* **752**:696c-705c.

Jung SH, Kim KI, Ryu JH, Choi SH, Kim JB, Moon JH and Jin JH. 2010. Preparation of radioactive core-shell type 198Au @SiO2 nanoparticles as a radiotracer for industrial process applications. *Appl. Radiat. Isot.* **68**:1025-1029.

Kim JB, Jung SH, Moon JH and Cho GS. 2011. Industrial gamma-ray tomographic scan method for large scale industrial plants. *Nucl Instr. and Meth. A.* **640**:139-150.

Kim JB, Jung SH, Moon JH and Cho GS. 2012. A feasibility study on gamma-ray tomography by Monte Carlo simulation for development of portable tomographic system. *Appl. Radiat. Isot.* **70**:404-414

Kim JB, Jung SH, Moon JH, Park JG, Jin JH and Cho GS. 2012. Development of transportable gamma-ray tomographic system for industrial application. *Nucl Instr. and Meth. A.* **693**: 203-208.

Kim JS, Jung SH and Kim JB. 2006. In-Service Identification of the Heterogeneous Zone in Petrochemical Pipelines by Using Sealed Gamma-ray Sources. *J. Korean Soc. Nondestr. Test.* **26**(3):169-173.

Kumar SB, Moslemian D and Dudukovic MP, Flow. 1995. A y-ray tomographic scanner for imaging voidage distribution in two-phase flow systems. *Meas. Instrum.* **6**(1):61-73.

Lange K and Carson R. 1984. EM Reconstruction Algorithms for Emission and Transmission Tomography. *J. Comput. Assist. Tomo.* **8**(2):306-316.

Legoupil S. 1997. An Experimental Single Photon Emission Computed Tomograph Method for Dynamic 2D Fluid Flow Analysis. *Appl. Radiat. Isot.* **48**:1507-1514.

Seibert J. 2004. X-ray Imaging Physics for Nuclear Medicine Technologists. Part I: Basic Principles of X-ray Production. *Journal of medicine Technology* **32**(3):139-147.

Manuscript Received: July 21, 2012
Revised: August 8, 2012
Revision Accepted: August 16, 2012