Journal of Radiation Industry 12(3) : 255~260(2018)

X-선 수하물 검색 시스템을 위한 32 채널 리드아웃 시스템 설계

김영수[1,*] · 최효정[1] · 김한수[1] · 이승재[2] · 박정민[1] · 강창구[1] · 박아현[1] · 하장호[1]

[1]한국원자력연구원 방사선기기연구부, [2]동서대학교 방사선학과

Design of a 32-Channel Readout System for X-ray Cargo Inspection

Young Soo Kim[1], Hyojeong Choi[1], Han Soo Kim[1], Seung-Jae Lee[2], Jeong Min Park[1], Chang Goo Kang[1], Ah Hyun Park[1] and Jang Ho Ha[1]

[1]*Radiation Equipment Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup-si, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea*
[2]*Department of Radiological Science, Dongseo University, 47 Jurye-ro, Sasang-gu, Busan 47011, Republic of Korea*

Abstract - In recent years, X-ray cargo inspection systems have been rapidly being installed at ports, airports, and borders to strengthen the security of baggage and the prohibition of transaction with drugs and contraband. We at Korea Atomic Energy Research Institute are currently developing a dual-energy X-ray cargo inspection system. In this study, a 64-channel charge sensitive readout system consisting of two 32-channel readout systems has been designed for collecting and amplifying signal charges from detector arrays. The 32-channel readout system was composed of 8 detector arrays (four photodiodes per one detector array, 2 mm pitch), 32 hold switches, 32 charge integrators, 32 reset switches, 32 sample-and-holds, 32 output switches, an output buffer, a frequency divider (divide by 4), and a 32-bit shift register. Each component was well designed and optimized for our system, and the size of the fabricated circuit board is 135 mm × 71.5 mm. From the visible light tests, the output pulses and the corresponding images were successfully acquired according to the intensity of the incident light.

Key words : X-ray radiography, Cargo inspection, Multi-channel, Readout circuit

서 론

최근에 전 세계적으로 수하물에 대한 보안과 마약 및 밀수품에 대한 거래 금지를 강화하기 위한 조치로 항만, 공항 및 국경 등에 방사선을 이용한 수하물 검색장치의 설치가 빠르게 진행되고 있다(Melnikov *et al*. 2011; Wang *et al*. 2013). 일반적으로 수하물의 형태와 밀도의 차이를 이용하여 판별하는 이중에너지 X-선 검색기가 사용되고 있으며, 최근에는 유무기물을 구별할 수 있는 중성자 검색기가 함께 사용되고 있다(Liu *et al*. 2008). 본 연구진에서는 현재 이중에너지 X-선 및 중성자를 동시에 이용하는 복합방사선 수하물 검색 시스템을 개발하고 있으며, 첫 번째 단계로 이중에너지 X-선 수하물 검색 시스템을 구성하는 핵심 모듈 개발을 진행 중에 있다. X-선 수하물 검색 시스템은 크게 9, 6 MeV 이중 에너지 X-선 펄스를 출력하는 선형가속기(LINAC) X-선 선원, X-선을 전기적 신호로 변환하여 디지털 데이터로 수집하는 검출기 모듈(Detector Module), 다

* Corresponding author: Young Soo Kim, Tel. +82-63-570-3702, Fax. +82-63-570-3748, E-mail. yskim75@kaeri.re.kr

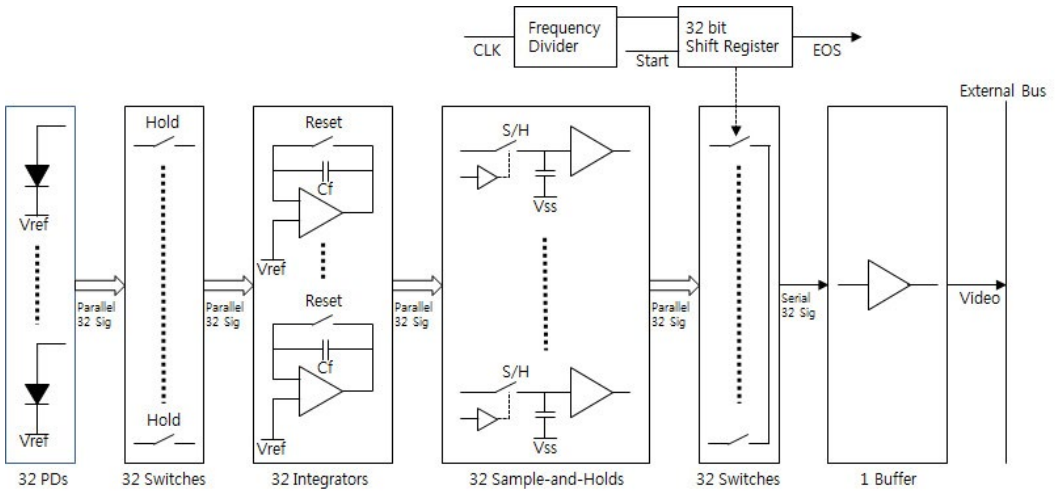

Fig. 1. Block diagram of the 32-channel readout system.

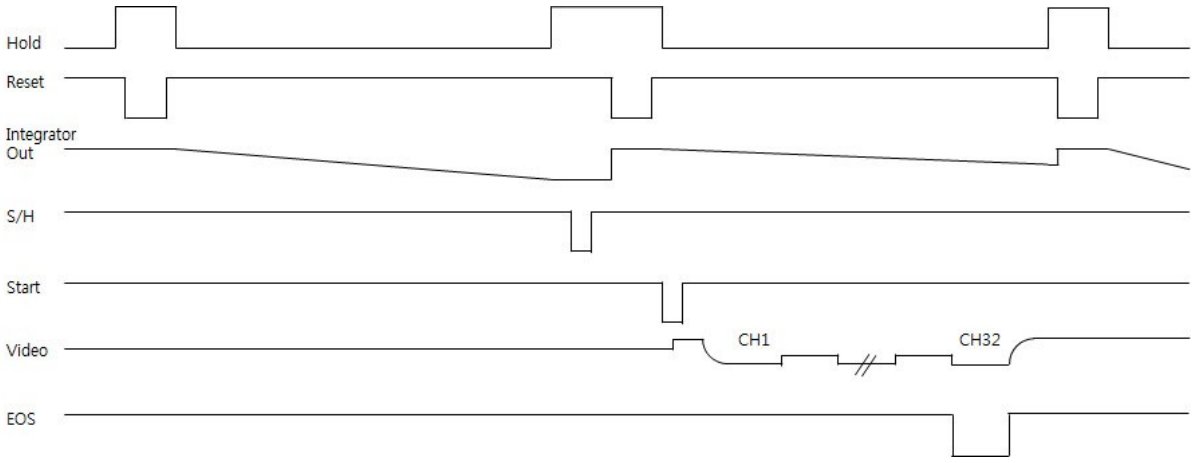

Fig. 2. Timing diagram of the 32-channel readout system.

수의 검출기 모듈을 제어하고 영상을 처리하는 제어유닛(Control Unit)으로 구성되어 있다. 검출기 모듈은 32 채널의 X-선 검출기와 전하 적분기(Charge Integrator) 등을 포함한 리드아웃 시스템(Readout System), 데이터 획득 시스템(Data Acquisition System, DAS)으로 구성되어 있으며, 이중 에너지 X-선 수하물 검색 시스템에서 X-선 영상의 품질에 영향을 미치는 민감도(Sensitivity)와 동작 대역(Dynamic Range)을 궁극적으로 결정하는 가장 중요한 구성 요소이다 (Wang *et al*. 2012; Wang *et al*. 2013). 본 연구에서는 32 채널의 X-선 검출기에서 생성된 신호 전하를 각 채널별로 수집하여 전압신호로 변환하고, 이를 순차적으로 직렬 형태의 아날로그 비디오 신호로 구성하여 디지털 데이터 획득 시스템으로 전송하는 전하 민감형 32 채널 리드아웃 시스템을 설계하였다.

재료 및 방법

블록도에서 보여주는 바와 같이 전하 민감형 32 채널 리드아웃 시스템은 8개의 검출기 어레이, 32개의 홀드 스위치, 32개의 전하 적분기, 32개의 리셋 스위치, 32개의 샘플/홀드, 32개의 출력 스위치, 1개의 출력 버퍼와 출력 스위치를 제어하는 논리 회로 블록으로 구성되어 있다(Fig. 1). 각각의 검출기 어레이는 4개의 포토다이오드 어레이에 $CdWO_4$ 섬광체 단결정이 결합되어 있으며, 논리 회로는 4배의 분주율을 가지는 주파수 분주기와 32 비트 시프트 레지스터로 이루어져 있다.

타이밍도에서는 32 채널 리드아웃 시스템의 동작을 보여준다(Fig. 2). 각각의 스위치는 로우 레벨에서 활성화되며, 출력 스위치를 제외한 모든 스위치를 제어하기 위한 Hold, Reset, S/H, Start, 클럭 신호는 제어 유닛으로부터 입력된다.

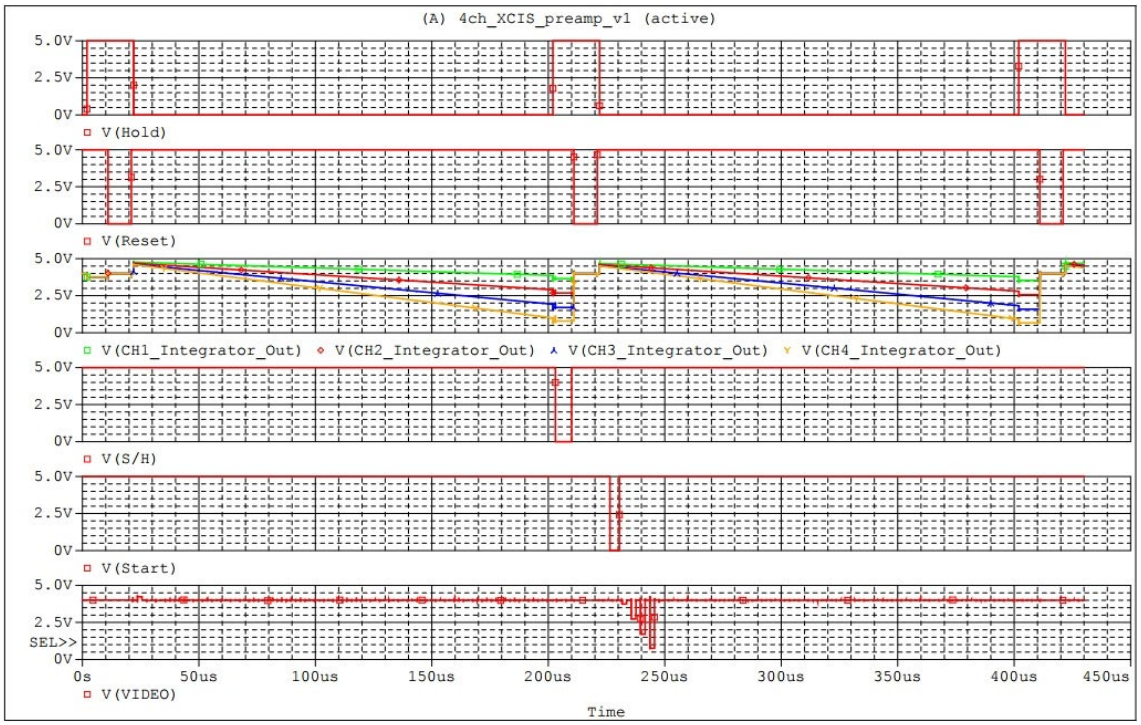

Fig. 3. PSpice circuit simulation results of the 4-channel readout circuit.

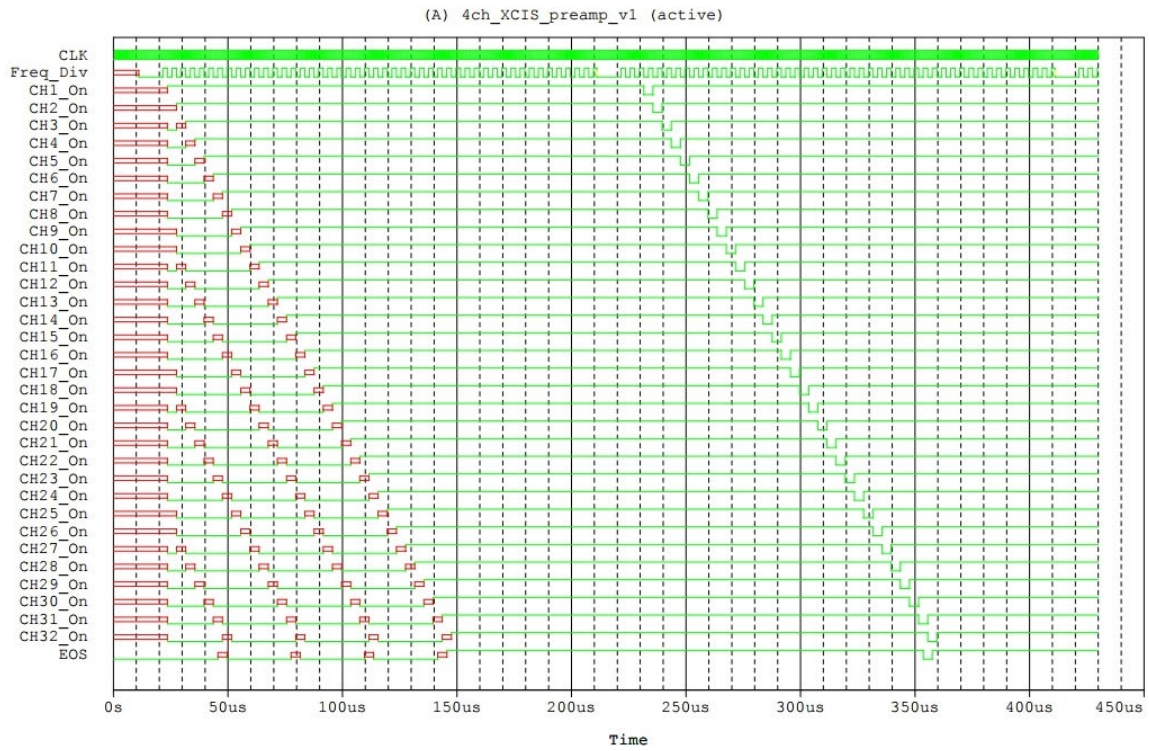

Fig. 4. PSpice circuit simulation results of the control logic circuit.

동작은 리셋, 전하 적분, 샘플의 3단계로 구분할 수 있다. 리셋 단계에서 리셋 스위치가 닫히고, 다른 모든 스위치가 열리게 되면 포토다이오드는 전하 적분기와의 연결이 끊어지고 적분기의 피드백 커패시터에 축적되어 있던 전하는 완전

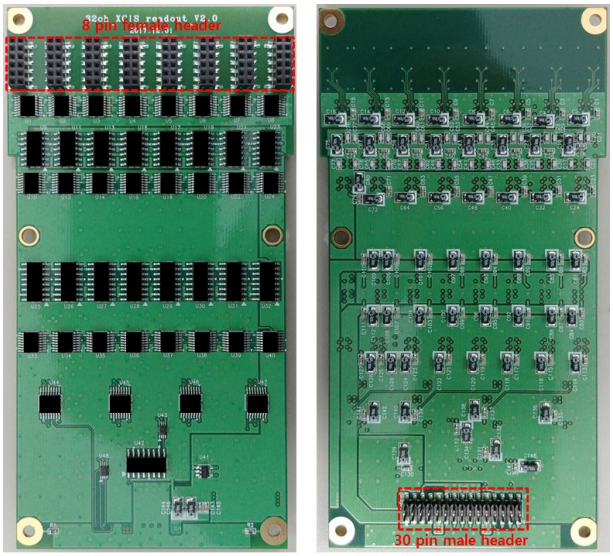

Fig. 5. The fabricated 32-channel charge sensitive readout system having eight female headers for mounting detector arrays and one male header for communicating to DAS. The board size is 135 mm × 71.5 mm.

하게 방전되어 적분기는 Vref 만큼의 초기 전압을 출력한다. 전하 적분 단계에서 홀드 스위치가 닫히고, 다른 모든 스위치가 열리게 되면 포토다이오드에서 생성된 전하는 적분기의 피드백 커패시터에 축적되어 전압 신호로 변환되어 출력된다.

즉, 전하 적분시간 동안 초기 전압 Vref에서 선형적으로 감소하는 전압 신호가 출력된다. 샘플 단계에서는 전하 적분기의 출력전압이 샘플/홀드에 저장되며, 이후 시프트 레지스터의 순차적인 스위칭에 따라 출력 버퍼를 통하여 하나의 직렬 형태의 비디오 전압 신호로 출력하게 된다. 전하 적분기는 낮은 잡음, 소비 전력 및 입력 커패시턴스, 높은 개방 루프 이득 및 단일 이득 대역폭을 가지는 상업적으로 이용 가능한 연산 증폭기와 피드백에 커패시터와 리셋 스위치를 구성하여 설계하였다. 제어유닛으로부터 입력된 클럭의 4배 분주율을 가지는 주파수 분주기를 구현하기 위하여 2개의 J-K 플립플롭을 직렬로 연결하여 구성하였으며, 분주된 클럭을 입력으로 하는 4개의 8 비트 시프트 레지스터를 직렬로 연결하여 32 비트 시프트 레지스터를 구현하였다.

32 채널 리드아웃 시스템을 설계하기 위하여 우선 4 채널 리드아웃 회로에 대한 PSpice 회로 시뮬레이션을 수행하여 동작을 확인하였다. 다만 출력 스위치를 제어하는 로직 회로에 대해서는 32 채널로 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 임의의 전류 신호를 포토다이오드에서 발생하는 전류로 가정하여 4개의 서로 다른 크기를 가지는 전류원을 각 채널의 입력으로 인가하고, 각각의 아날로그 스위치에 Hold, Reset, S/H, Start, 로직 회로 출력 펄스를 Fig. 2의 타이밍

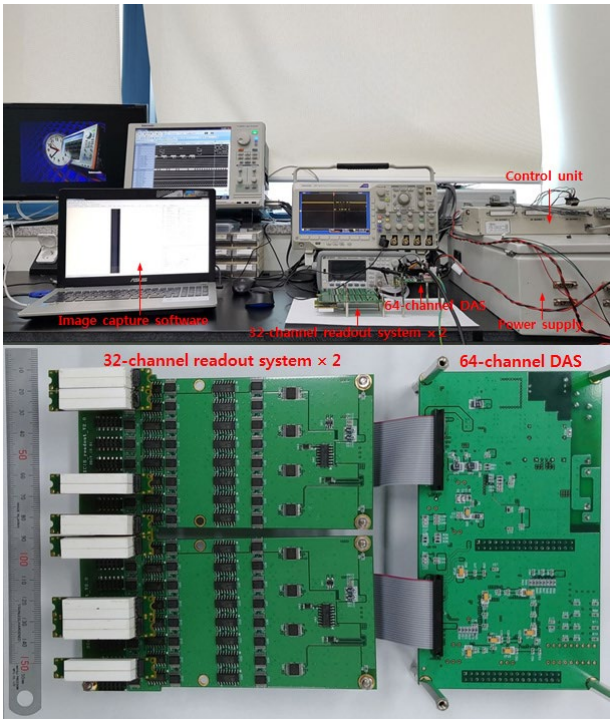

Fig. 6. Experimental setup configured with two 32-channel readout systems mounting 8 detector arrays, 64-channel DAS, control unit and image capture software.

도와 같이 인가하여 전하 적분기와 출력 버퍼의 출력 신호를 확인한 결과 예측한대로 Fig. 3과 같이 정상적으로 동작하는 것을 알 수 있었다. 또한 제어 유닛으로부터 전달된 1 MHz의 주 클럭을 입력으로 하는 분주기는 4배의 분주율을 가지는 250 kHz의 정확히 동기화된 2차 클럭을 생성하는 것을 확인하였으며, 이 2차 클럭과 Start 신호를 입력으로 하는 32 비트 시프트 레지스터도 32개의 스위칭 펄스와 EOS 펄스를 설계된 타이밍에 생성하는 것을 확인하였다(Fig. 4). Fig. 3의 회로 시뮬레이션 결과로부터 4 채널 리드아웃 회로를 32 채널로 확장하여 설계를 완성하였다.

신호의 손실과 잡음을 최소화 할 수 있도록 부품의 배치, 배선, 전원 및 접지를 고려하여 Fig. 5와 같이 인쇄 회로 기판(PCB, Printed Circuit Board)를 제작하고 조립하였다. 제작된 32 채널 리드아웃 시스템은 검출기 어레이를 장착할 수 있는 8개의 12핀 헤더 소켓과 데이터 획득 시스템과 통신할 수 있는 1개의 30핀 헤더 핀을 포함하며, 크기는 135 mm × 71.5 mm이다.

결과 및 고찰

제작한 32 채널 리드아웃 시스템의 동작을 검증하기 위하여 Fig. 6과 같이 검출기 어레이가 장착된 2개의 32 채널

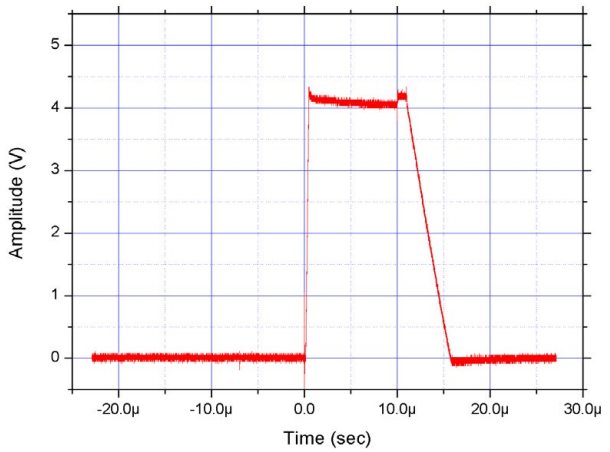

Fig. 7. Output pulse of the charge integrator measured through the oscilloscope.

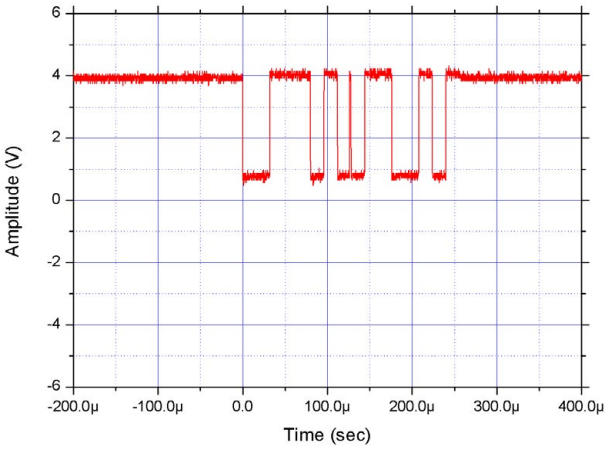

Fig. 8. Output pulse of the 32-channel readout system measured through the oscilloscope.

리드아웃 시스템과 자체 개발한 64 채널 데이터 획득 시스템, Detection Technology Oyj. (DT) 사의 제어 유닛, 전원공급 장치, 영상획득 소프트웨어를 이용하여 실험 환경을 구성하였으며, 정상 동작 여부를 확인하고자 가시광 상태에서 테스트를 수행하였다. 외부에서 조사되는 빛의 유무에 따른 출력 비디오 신호 및 획득 영상의 차이를 확인하기 위하여 16개의 헤더 중 8개를 임의로 선정하여 DT 사의 검출기 어레이를 장착하였다. 8개의 검출기 어레이가 장착된 헤더의 위치는 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 위에서부터 차례대로 1, 2, 6, 8, 9, 12, 13, 15번이다.

전하 적분기의 출력 펄스와 32 채널 리드아웃 시스템의 최종 출력 펄스(비디오 신호)를 검출기 어레이에 가시광을 연속적으로 조사하고 있는 상태에서 오실로스코프를 통하여 측정하였다. 장착된 검출기가 없는 채널의 경우, 이 채널을 통하여 흐르는 신호 전류가 없으므로 전하 적분기의 출

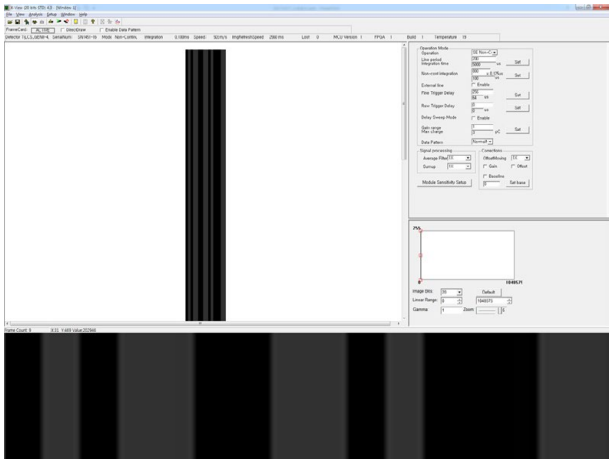

Fig. 9. Captured image when the visible light is exposed to 8 detector arrays.

력 및 32 채널 리드아웃 시스템의 출력 전압의 크기는 변화 없이 4 V를 유지하였다(Fig. 8). 반면에 검출기 어레이가 장착된 채널의 경우, 전하 적분 시간 동안 동일한 크기의 신호 전류가 지속적으로 흘러 Fig.7과 같이 전하 적분기의 출력 전압은 선형적으로 감소하여 포화 상태에 이르게 되고 리드아웃 시스템의 출력 펄스는 Fig. 8과 같이 포화상태의 전압을 유지 하였다. 동일한 조건하에서 Fig. 9와 같이 라인 패턴의 영상을 획득 하였다. 획득한 영상에서 가장 오른쪽이 1번 채널이며, 리드아웃 시스템의 출력 펄스의 크기가 4 V일 경우 검정색으로 표시되고, 0 V로 갈수록 흰색에 가까워진다.

결 론

8개의 검출기 어레이 헤더 소켓, 32개의 홀드 스위치, 32개의 전하 적분기, 32개의 리셋 스위치, 32개의 샘플/홀드, 32개의 출력 스위치, 1개의 출력 버퍼와 출력 스위치를 제어하는 논리 회로 블록으로 구성된 이중 에너지 X-선 수하물 검색 시스템을 위한 전하 민감형 32 채널 리드아웃 시스템을 설계하였다. 가능한 최대 전하 적분시간은 200 μsec이고, 가시광 상태에서 출력 펄스의 크기 및 패턴을 측정한 결과 비디오 신호 크기의 동작 범위는 0.7~4 V이었다. 또한 영상획득 소프트웨어를 이용하여 테스트 영상을 획득하여 설계된 32 채널 리드아웃 시스템이 성공적으로 동작하는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Nuclear Research and

Development program of Korea Ministry of Science and ICT (Grant NRF-2017M2A2A4A05018259). It was also technically supported by Radiation Equipment Fabrication Center in KAERI.

참 고 문 헌

Liu Y, Sowerby BD and Tickner JR. 2008. Comparison of neutron and high-energy X-ray dual-beam radiography for air cargo inspection. *Appl. Radiat. Isot.* **66** (4):463-473.

Melnikov Y, Avtonomov P, Kornienko V and Olshansky Y. 2011. Detection of Dangerous Materials and Illicit Objects in Cargoes and Baggage: Current Tools, Existing Problems and Possible Solutions. *J. Homel. Secur. Emerg. Manag.* **8** (1):Article49:1-17.

Wang X, Yang H, Yuan Y and Wu W. 2012. A Multi-channel Charge Readout IC With Offset Calibration For X-ray Industrial Inspection. 2012 5th International Congress on Image and Signal Processing. 1677-1680.

Wang X, Yang H, Yuan Y and Wu W. 2013. A low noise multi-channel readout IC for X-ray cargo inspection. *J. Semicond.* **34** (4):Article045011:1-6.

Received: 10 July 2018
Revised: 1 September 2018
Revision accepted: 10 September 2018