X-선 화물 검색기용 64채널 데이터 획득 시스템 개발

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

[1]한국원자력연구원 방사선기기연구부, [2]동서대학교 방사선학과

Development of a 64-channel Data Acquisition System for X-ray Cargo Inspection System

Hyojeong Choi[1], Young Soo Kim[1], Seung-Jae Lee[2], Jang Ho Ha[1], Jeong Min Park[1], Chang Goo Kang[1], Ah Hyun Park[1] and Han Soo Kim[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 - X-ray cargo inspection systems installed in airports and borders, are used to identify contraband such as nuclear materials, explosives, or drugs. It includes X-ray generator, cargo transporting equipment, control system and image processing system. The image processing system, particularly, is composed of sensor module, data acquisition system, control unit and computer. In this study, we have been developed a data acquisition system for FPGA-based 64-channel image sensor module. The system produces local timing signals to control the sensor module, digitize analog output signals generated from sensor module, and transmit digital data sequentially to control unit without loss. The timing of the main control signals was verified by using a logic analyzer. The detector array was irradiated with visible light, and output pulses corresponding to the incident direction and intensity were observed by oscilloscope. Finally, the images were successfully captured according to the intensity of visible light by data acquisition software.

Key words : FPGA, X-ray inspection, Data acquisition system

서 론

X-선만을 사용한 보안검색기의 단점을 극복하기 위하여, 차세대 보안 검색기술인 이중에너지 X-선 및 중성자 검출 시스템을 이용한 보안검색시스템이 활발히 연구되고 있다 (Sowerby and Tickner 2007; Liu *et al*. 2008). 기존의 X-선만을 사용한 화물용 보안검색시스템은 항공, 항만 컨테이너 등에 설치되어 대상의 형태만을 확인할 수 있는 반면, 중성자 검색기를 사용하면 화물 내 물질의 정보를 획득할 수 있어 핵물질, 폭발물이나 마약과 같은 밀수품의 식별 능력이 매우 우수하다(Buffler and Tickner 2010; Liew *et al*. 2017). 따라서 본 연구진은 위와 같은 특징을 갖는 항공화물 보안검색용 복합방사선 보안검색기의 개발을 진행 중에 있다. 이를 위해 먼저 X-선을 이용하여 검색 대상인 화물의 형태, 모양 등의 정보를 높은 분해능 및 해상도를 갖는 영상으로 획득하기 위하여 이중에너지 X-선 보안검색시스템을 개발하고 있다. 보안검색시스템은 X-선 발생장치, 이송시스템, 제어시스템, 영상처리시스템 등으로 구성된다. 특히 영상처리시스템은 센서 모

* Corresponding author: Han Soo Kim, Tel. +82-63-570-3703, Fax. +82-63-570-3748, E-mail. khsoo@kaeri.re.kr

듈, DAS 보드, 제어 유닛, PC 등으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 센서 모듈에 필요한 로컬 타이밍 신호를 생성하고 센서 모듈에서 발생한 아날로그 신호를 디지털화하기 위하여 18-bit analog to digital Converter (ADC)를 사용한 FPGA 기반의 64채널 영상센서 모듈용 DAS 보드를 개발하였다. 이 외에도 SRAM, 라인 드라이버, 버퍼, 레귤레이터 등의 소자를 사용하여 손실 및 잡음 없이 디지털 데이터를 순차적으로 제어 유닛으로 전송할 수 있도록 소자 배치를 최적화하였다. 64채널 데이터 획득 보드는 16개까지 연결이 가능하도록 제작하여 총 1,024개의 X-선 검출 채널을 갖는 X-선 영상시스템으로 구성이 가능하다.

재료 및 방법

검출 모듈은 DAS 보드, 센서 모듈로 구성되어 있으며 Fig. 1의 블록 다이어그램과 같이 검출 모듈 간의 연결이 가능하다. 제어 유닛의 한 세그먼트 당 16개까지 검출 모듈을 연결하여 최대 1,024개의 X-선 검출 채널(32채널×2 리드아웃 시스템×16 DAS 보드)이 가능하도록 설계하였다. X-선의 검출을 위해 제어 유닛으로부터 발생하는 제어 신호들이 DAS 보드로 전송된다. 전송된 신호들을 기반으로 보드 내의 FPGA에서 센서 모듈 내의 각 소자들의 동작에 필요한 로컬 타이밍 신호를 생성하여 센서 모듈로 전송한다.

센서 모듈은 $CdWO_4$ 섬광체, Si-PIN 포토다이오드로 구성된 8개의 검출기 어레이, 32개의 전치증폭단, 32개의 홀드 및 리셋 스위치, 32개의 샘플 앤 홀드 스위치, 32개의 출력 스위치, 1개의 출력 버퍼로 구성되어 있으며, 검출 센서를 제외한 센서 모듈의 32채널 리드아웃 시스템은 참고문헌(김 등 2018)에서 기술한 바 있다.

센서 모듈의 동작 원리는 다음과 같다: X-ray가 섬광체에 입사하여 가시광선으로 변환되고, 이 가시광선은 포토다이오드에 의해 전류로 변환된다. 각 채널에서 생성된 전류는 각각의 포토다이오드와 연결된 전치증폭단에서 전압 신호로 출력된다. 전압 신호는 샘플 앤 홀드 과정을 거친 후, 시프트 레지스터를 통해 각 채널의 전압 신호들이 순차적으로 DAS 보드로 전송된다.

FPGA의 프로그램은 Verilog 언어를 사용하여 설계하였으며, Modelsim 소프트웨어를 통해 설계한 FPGA에서 발생한 타이밍 신호를 확인하였다. Fig. 2는 제어 유닛에서 발생한 제어 신호 및 이를 기반으로 FPGA에서 생성한 센서 모듈에 사용되는 제어 신호의 타이밍도를 보여준다. X-선 발생 트리거 신호가 제어 유닛으로부터 발생하면 FPGA에서 홀드 스위치를 열어 센서와 전치증폭단의 연결을 차단한 후, 리셋 스위치를 닫아 전치증폭단에 축적된 전하를 모두 방전시키고, 설정된 X-선 축적 시간 동안 홀드 스위치를 닫아 전하를 축적하여 전압 신호로 변환되도록 회로를 설계하였다. 또한 X-선 축적 시간이 종료되면 홀드 스위치를 열어 더 이상의 전하 축적을 차단한 후 샘플 앤 홀드 스위치를 열어 출력 전압 신호를 저장하며, 시프트 레지스터에서 시작 트리거 신호를 받아 샘플 앤 홀드에 저장된 각 검출 채널의 출력 전압 신호를 순차적으로 DAS 보드로 전송하도록 구성하였다.

설계한 DAS 보드에 사용된 주요 소자 및 데이터의 흐름은 Fig. 3의 블록 다이어그램과 같다. 제어 유닛에서 발생한 클록, X-선 발생 트리거, 시작 트리거, 데이터 전달을 위한 타이밍 신호 등이 라인 드라이버를 거쳐 FPGA로 입력된다.

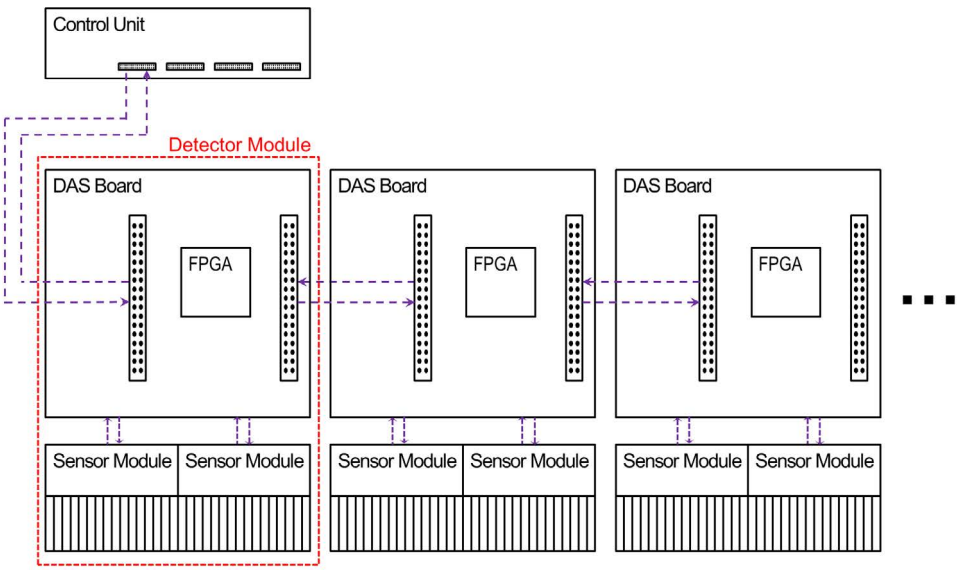

Fig. 1. Block diagram of the detector module including DAS board and sensor modules.

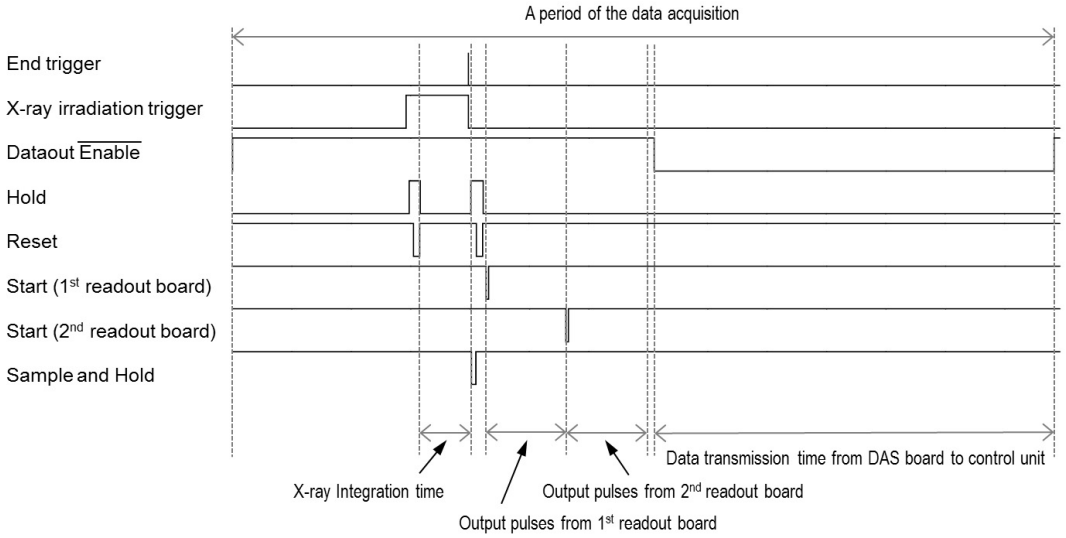

Fig. 2. Timing diagram of the control signals from the control unit and main control signals of the programmed FPGA.

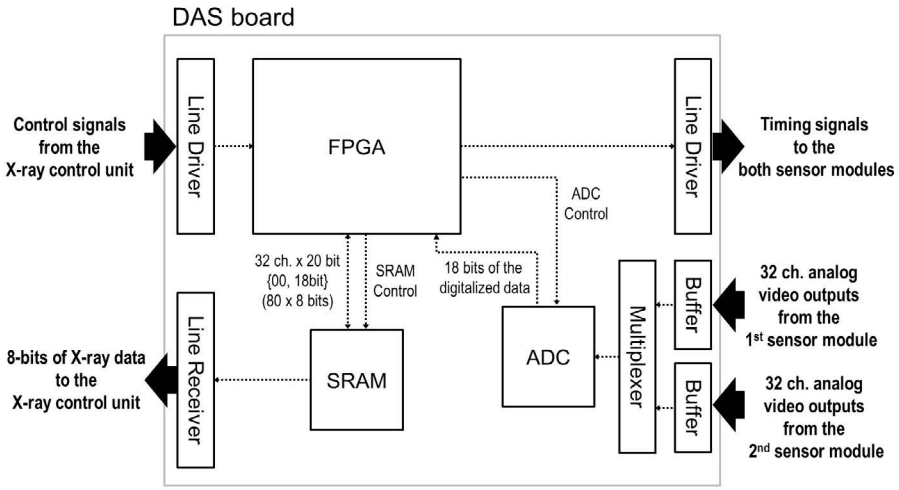

Fig. 3. Block diagram of the designed DAS board.

FPGA에서는 이를 기반으로 센서 모듈의 리드아웃 시스템을 동작시키기 위한 홀드, 리셋, 샘플 앤 홀드, 시작 등의 로컬 타이밍 신호를 생성하여 센서 모듈로 전달하고, ADC, static random access memory (SRAM) 및 멀티플렉서 등의 제어 신호를 생성하도록 설계하였다. 각 센서 모듈 당 X-선의 에너지 정보를 갖는 32채널의 아날로그 출력 전압 신호들은 버퍼를 거쳐 순차적으로 DAS 보드로 입력되며, 멀티플렉서를 통해 두 센서 모듈의 32채널 X-선 데이터를 순서대로 각각 ADC로 전달한다. 정밀한 디지털 처리를 위해 18비트의 ADC를 사용하였다. 18비트로 디지털화된 총 64채널의 X-선 데이터는 FPGA로 입력된 후, 인접한 두 채널끼리의 출력 데이터값의 평균을 계산하여 20비트의 크기를 갖는 32채널의 데이터로 변환한다. 이 데이터들은 256 kilobytes의 메모리를 갖는 SRAM에 8비트씩 80개의 어드레스에 저장되어 출력 타이밍 신호를 통해 제어 유닛으로 전송된다.

Fig. 4는 각 DAS 보드의 데이터출력 트리거 신호에 대한 타이밍 도로서, 제어 유닛으로부터 첫 번째 DAS 보드에서 획득한 데이터출력 트리거 신호부터 마지막 단의 DAS 보드의 데이터출력 트리거 신호를 나타낸다. 각 DAS 보드에서는 데이터 출력 트리거 신호가 로우 레벨로 변화할 때 500 ns의 주기를 갖는 8비트 데이터 80개를 앞의 DAS 보드로 전달하며, 첫 번째 DAS 보드에서는 전체 데이터를 제어 유닛으로 전송한다. Fig. 5는 개발한 검출 모듈을 나타내며, 1개의 검출 모듈은 1개의 DAS 보드, 2개의 리드아웃 보드 및 16개의 X-선 검출 센서 어레이로 구성되어 있다. DAS 보드 뒷면의 30핀 커넥터를 통해 2개의 리드아웃 보드가 장착되며, 리드아웃 보드

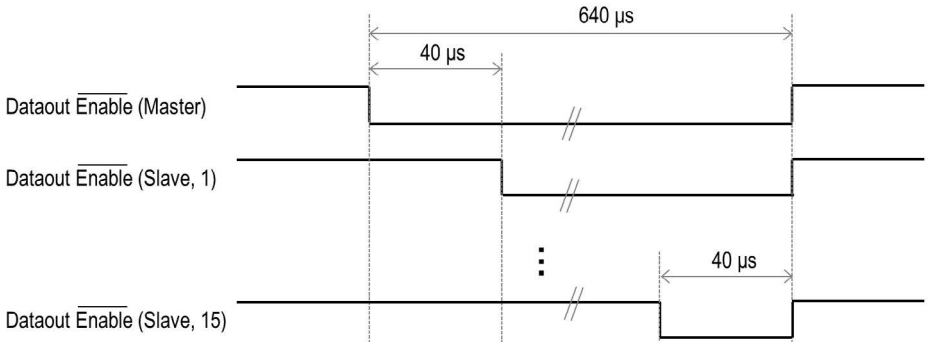

Fig. 4. Timing diagram of the dataout enable signals.

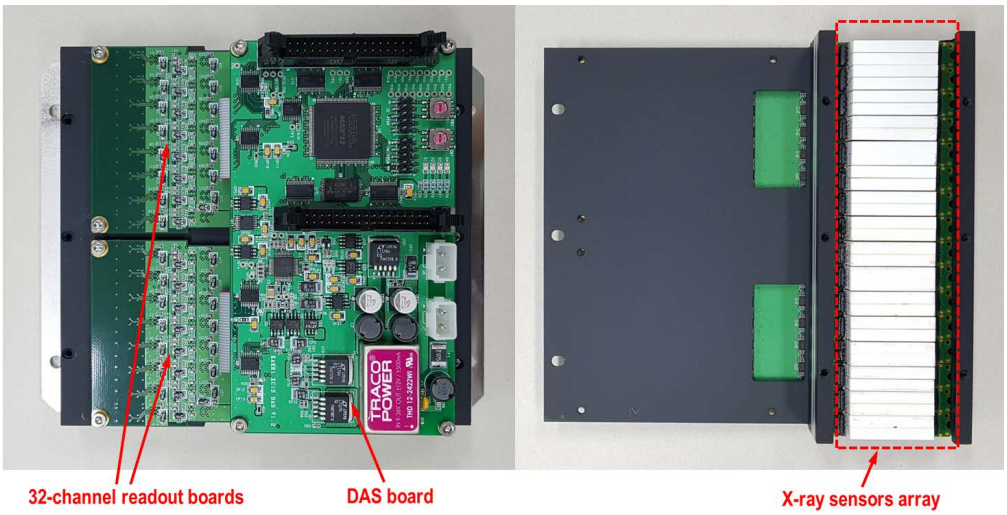

Fig. 5. A detector module consisted of a data acquisition system board, 2 readout boards and 16 X-ray sensors array.

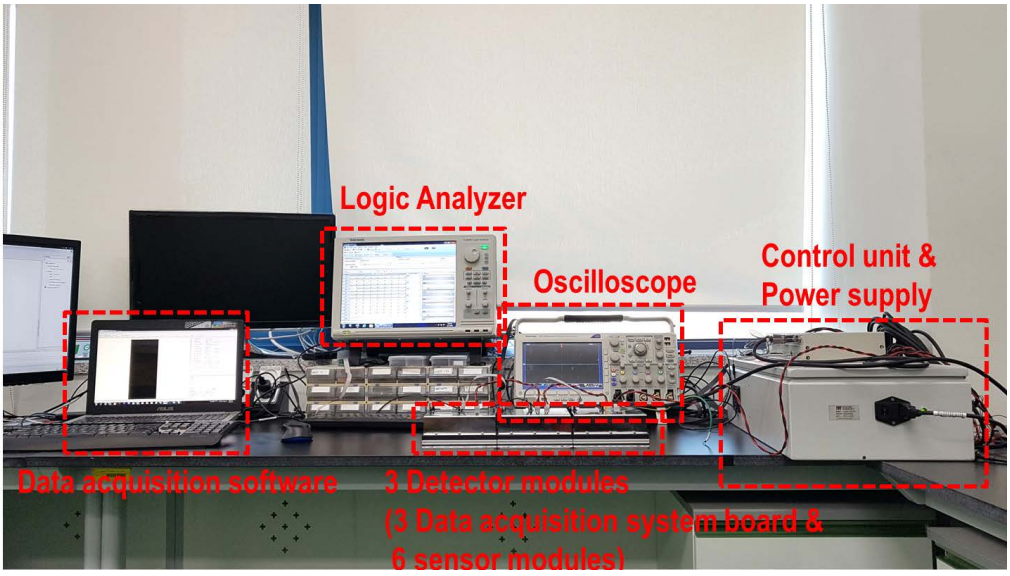

Fig. 6. Experimental setup.

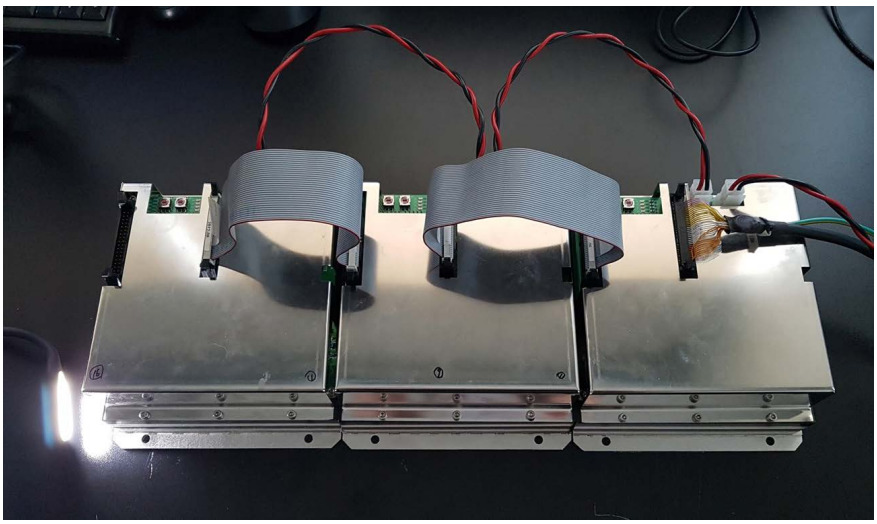

Fig. 7. Irradiation of the visible light.

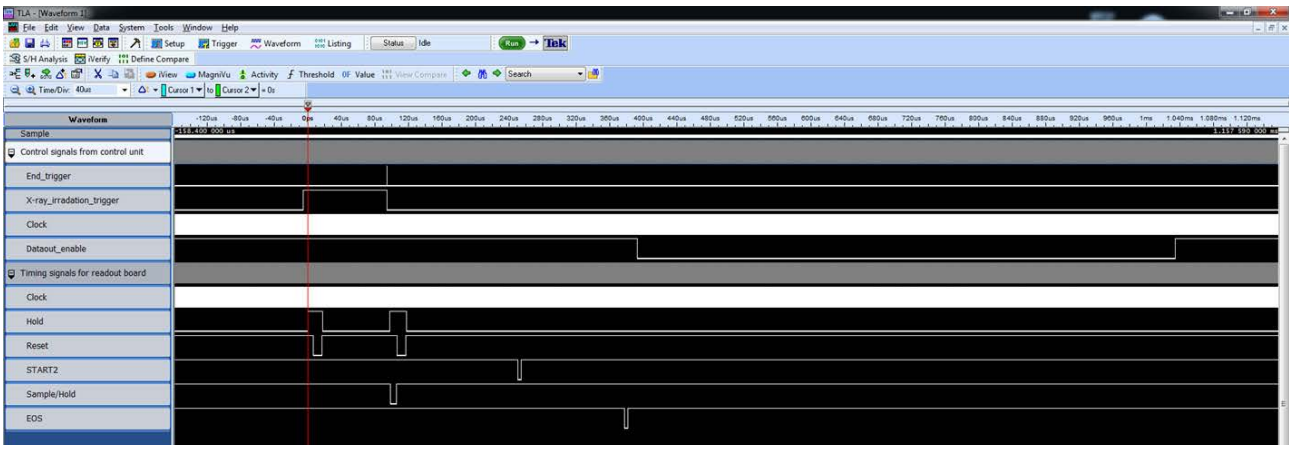

Fig. 8. Control signals from the control unit and main timing signals to control the sensor module.

하나에는 32채널의 X-선 센서가 장착되어 DAS 보드 당 총 64채널의 X-선 센서 입력을 갖는다. 제작 시 주요 고려 사항으로는, 아날로그 신호 전송 시 발생하는 손실 및 잡음을 최소화할 수 있도록 신호 전송 라인을 최대한 짧게 설계하였으며, 각 채널의 출력으로부터 ADC까지 연결된 신호 전송 라인의 길이를 동일하게 설계하였다. DAS 보드의 크기는 184 mm × 147 mm로, 보드의 가로 길이는 64채널의 검출 센서들을 입사방사선에 수직방향으로 일렬로 배열하였을 때의 길이와 동일하다.

결과 및 고찰

제작한 DAS 보드의 동작을 확인하기 위하여, Fig. 6과 같이 실험 환경을 구성하였다. 3개의 검출 모듈, 제어 유닛과 전원 공급장치, 생성된 신호들의 타이밍을 확인하기 위한 로직 분석기, 아날로그 출력 신호의 확인을 위한 오실로스코프, 영상 획득을 위한 데이터 획득 소프트웨어를 사용하였다. 검출 모듈의 정상적인 동작을 검증하기 위해서, Fig. 7과 같이 세 번째 검출 모듈의 마지막 채널 방향에 가시광선을 조사하여 실험을 수행하였다.

먼저 로직 분석기를 사용하여 FPGA에서 생성된 검출 모듈의 제어에 필요한 주요 신호들의 타이밍을 검증하였으며, 이를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 2의 타이밍도와 같이, 설계한 FPGA 프로그램의 Modelsim 시뮬레이션 결과와 일치하는 것을 확인하였다. 주요 신호들의 역할은 다음과 같다: 리셋 신호가 0일 때 리셋 스위치가 닫혀 전치증폭단에 축적되어 있는 전하를 방전시킨다. 그 후 리셋 신호가 1, 홀드 신호가 0이 되어 리셋 스위치가 열리며 홀드 스위치를 닫는다. 홀드 스위치가 닫히면 검출기와 전치증폭단이 연결되어 다음 홀드 스위

치가 열리는 시간까지 검출기에서 발생된 전하가 전치증폭단에 축적되고, 축적된 전하만큼 전압 신호로 변환된다. 변환된 전압 신호, 즉 출력 파형은 축적된 전하의 양에 비례한다. 그 후 샘플 앤 홀드 신호에 의해 스위치가 닫히면 각 채널의 전압 신호가 순차적으로 DAS 보드로 전송된다. 리드아웃 시스템에서 DAS 보드로 전달되는 신호는 각 X-선 채널의 아날로그 출력 전압 펄스 및 EOS (End Of Scan) 신호이다. 리드아웃 보드에서는 마지막 채널, 즉 32번째 아날로그 출력 전압 펄스를 DAS 보드로 전송할 때 EOS 신호를 생성하여 DAS 보드로 전송함으로써 모든 출력이 정상적으로 전송되었음을 알려준다. 3번째 DAS 보드로 전달되는 리드아웃 시스템의 출력 신호들, 즉 129~192번째 채널의 출력 펄스 및 EOS 신호를 오실로스코프로 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 아날로그 출력 전압 펄스의 각 채널 폭은 4 μs이며, 각 리드아웃 시스템은 32채널을 가지므로 한 주기에 총 256 μs 동안 아날로그 출력 전압 펄스를 보드로 전달하고, 32번째 채널의 데이터를 전달하고 난 후 EOS 신호를 생성하는 것을 확인할 수 있다. 출력 전압 펄스는 마지막 채널부터 전달이 되므로 0 μs는 192번째 채널, EOS 신호가 발생하는 248 μs는 129번째 채널에 해당한다. 출력 펄스가 발생한 채널은 192번째 채널에서 163번째 채널이며, 오실로스코프로 확인한 결과 0 μs에서부터 약 116 μs의 구간에 걸쳐 펄스가 발생한 것을 확인할 수 있다. 빛이 조사되고 있는 방향의 채널 부근에서는 출력 파형의 높이가 포화되는 것을 확인할 수 있으며, 점차 출력 펄스의 높이가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그 이후부터는 검출기에 빛이 도달하지 않아 펄스의 높이가 없이 기준 전압인 4 V를 유지하고 있다. 마찬가지로 1~128번 채널에서는 외부에서 빛이 조사되지 않으므로 출력 펄스가 발생하지 않는다.

Fig. 10은 데이터 획득 소프트웨어를 사용하여 획득한 영상으로, 오실로스코프로 측정한 결과와 비교했을 때 출력 펄스가 4 V에서 0 V로 갈수록 영상은 밝은 색을 보인다. 아날로그 출력은 가장 마지막 채널의 출력부터 보드로 전달하지만, 소프트웨어는 가장 왼쪽부터 1번 채널을 나타낸다. Fig. 10의

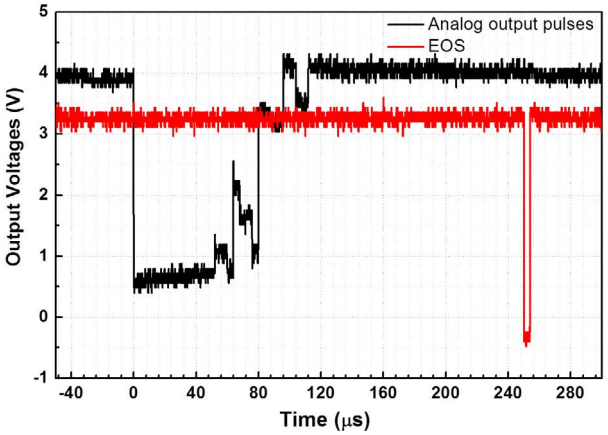

Fig. 9. Output pulse and EOS signal of a 6th readout board measured by oscilloscope.

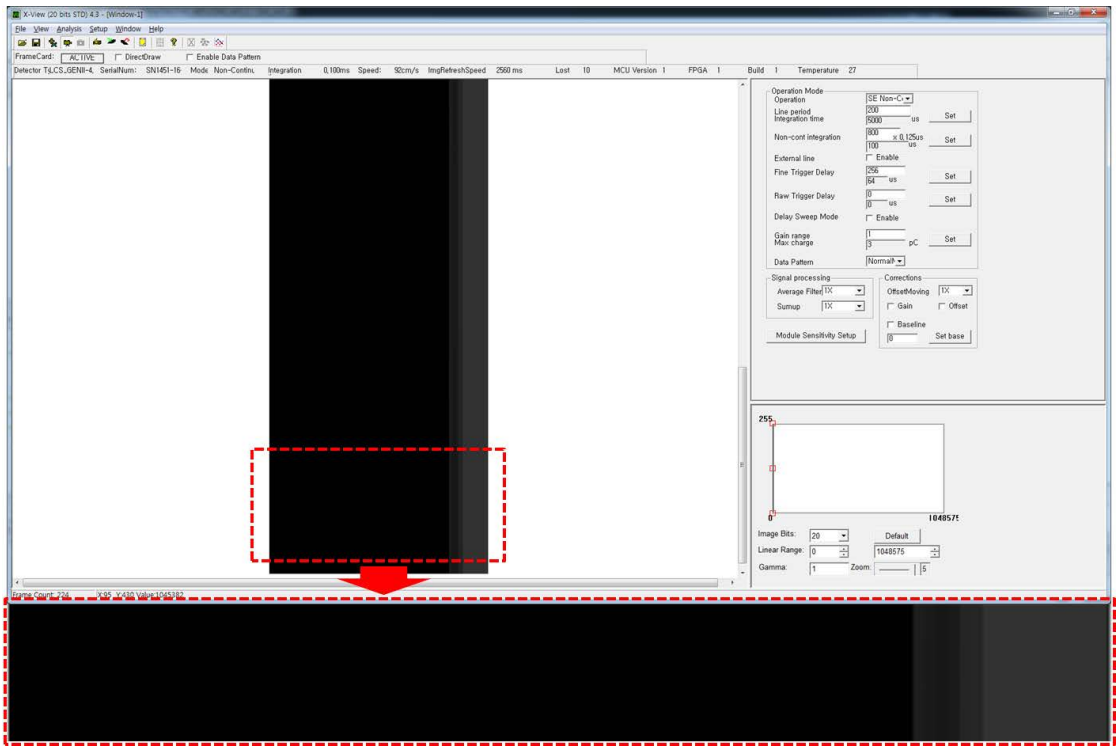

Fig. 10. Image captured by data acquisition software.

결과와 같이 마지막 채널에서 밝은 영상을 나타내고 앞의 채널로 갈수록 영상이 어두워지는 것을 확인할 수 있다.

결 론

센서 모듈을 동작시키기 위한 타이밍 신호의 생성 및 ADC, SRAM 등의 제어를 위해 FPGA 기반의 화물 보안검색 시스템용 DAS 보드를 개발하였다. 0 V~4 V의 범위를 20비트의 값의 분해능으로 표현하며, 개발한 64채널의 DAS 보드는 직렬로 16개까지 연결하여 총 1,024개의 X-선 검출 채널을 가질 수 있어 높은 분해능 및 해상도의 영상 획득이 가능하다. 최종적으로 데이터 획득 소프트웨어를 사용하여 자체 개발한 리드아웃 시스템과 DAS 보드를 포함한 검출 모듈이 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 3개의 검출 모듈을 제작하여 동작 평가를 수행하였으며, 검출 모듈의 추가 제작을 통해 총 16개의 검출 모듈을 연결하여 총 1,024개의 채널을 갖는 전체 X-선 영상시스템에 대한 성능 평가를 수행할 예정이다.

사 사

This study 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

김영수, 최효정, 김한수, 이승재, 박정민, 강창구, 박아현, 하장호. 2018. X-선 수하물 검색 시스템을 위한 32 채널 리드아웃 시스템 설계. 방사선산업학회지. **12**(3):255-260.

Buffler A and Tickner J. 2010. Detecting contraband using neutrons: Challenges and future directions. *Radiat. Meas.* **45**(10):1186-1192.

Liew SV, Bertozzi W, D'Olympia N, Franklin WA, Korbly SE, Ledoux RJ and Wilson CM. 2017. Identification and imaging of special nuclear materials and contraband using active x-ray interrogation. *Phys. Procedia*. **90**:313-322.

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.

Sowerby BD and Tickner JR. 2007. Recent advances in fast neutron radiography for cargo inspection. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* A. **580**(1):799-802.

Received: 24 January 2019
Revised: 13 February 2019
Revision accepted: 7 March 2019