

# 의료 및 산업용 X-선 발생장치의 선량평가를 위한 면적선량계(DAP) 개발

## Development of DAP(Dose Area Product) for Radiation Evaluation of Medical and Industrial X-ray generator

곽 동 훈\*, 이 상 현\*\*, 이 승 호\*\*\*

Dong-Hoon Kwak\*, Sang-Heon Lee\*\*, Seung-Ho Lee\*\*\*

### Abstract

In this paper, we propose an DAP system for dose evaluation of medical and industrial X-ray generator. Based on the DAP measurement technique using the Ion-Chamber, the proposed system can clearly measure the exposure radiation dose generated by the diagnostic X-ray apparatus. The hardware part of the DAP measures the amount of charge in the air that is captured by an X-ray. The high-speed processing algorithm part for cumulative radiation dose measurement through microcurrent measures the amount of charge captured by X-ray at a low implementation cost (power) with no input loss. The wired/wireless transmission/reception protocol part synchronized with the operation of the X-ray generator improves communication speed. The PC-based control program part for interlocking and aging measures the amount of X-ray generated in real time and enables measurement graphs and numerical value monitoring through PC GUI. As a result of evaluating the performance of the proposed system in an accredited testing laboratory, the measured values using DAP increased linearly in each energy band (30, 60, 100, 150 kV). In addition, since the standard deviation of the measured value at the point of 4 division was  $\pm 1.25\%$ , it was confirmed that the DAP showed uniform measurements regardless of location. It was confirmed that the normal operation was not less than  $\pm 4.2\%$  of the international standard.

### 요 약

본 논문에서는 의료 및 산업용 X-선 발생장치의 선량평가를 위한 면적선량계(DAP)의 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 Ion-Chamber를 이용한 면적선량 측정기술을 기반으로 진단용 X-선 장치에 의해 발생된 피폭선량을 명확히 측정할 수 있다. 면적선량계의 하드웨어부는 공기 중에서 X-선에 의해 전리되는 전하의 양을 측정한다. 미소 전류를 통한 누적선량 측정을 위한 고속 처리 알고리즘부는 입력 손실 없이 낮은 구현비용(전력)으로 X-선에 의해 전리되는 전하의 양을 측정한다. X-선 발생장치의 동작에 동기화된 유무선 송수신 프로토콜부는 통신 속도를 향상시킨다. 연동 및 에이징을 위한 PC 기반 제어 프로그램부는 실시간으로 발생된 X-선량을 측정하여 PC용 GUI를 통해 측정 그래프 및 수치 모니터링이 가능하도록 한다. 제안된 시스템의 성능을 공인시험기관에서 평가한 결과, 각각의 에너지 대역(30, 60, 100, 150kV)에서 면적선량계에 측정되는 값이 선형적으로 증가됨을 확인할 수가 있었다. 또한 4등분한 지점에서 측정기의 지시치에 대한 표준편차가  $\pm 1.25\%$ 를 나타내어서 면적선량계가 위치에 관계없이 균일한 측정값을 나타냄을 확인하였다. 한편,  $\pm 4.2\%$ 의 불확도가 측정되어서 국제 표준인  $\pm 15\%$  이하에서 정상동작 됨이 확인되었다.

*Key words* : DAP Meter, X-ray, Ion Chamber, High Speed Algorithm, Protocol, PC GUIP

\* Dept. Electronic Engineering, Hanbat National University

\*\* DAON Technology Co. Ltd

\*\*\* Dept. Electronics&Control Engineering, Hanbat National University

★ Corresponding author

E-mail: shlee@cad.hanbat.ac.kr, Tel: +82-42-821-1137

Manuscript received June. 9, 2018, revised June. 21, 2018, accepted June. 21, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

현재 의료 진단용 방사선 장비에 의한 환자와 의료종사자의 피폭 문제 매우 심각한 상황으로 각국 정부는 국민건강 보호차원에서 피폭 저감을 위한 관리방안 마련에 분주하고 있다. 그러나 현재 방사선 피폭을 가장 효과적으로 측정할 수 있는 방법은 면적선량계로 알려져 있으나 국내에서는 고가의 외산장비에 의존하는 상황으로 국민건강 보호차원에서 면적선량계의 국산화 개발이 시급한 실정이다. 따라서 본 논문에서 제안하는 의료 및 산업용 X-선 발생장치의 선량평가를 위한 면적선량계 시스템은 고가의 외국산 제품에 의존하고 있는 면적선량계 시스템의 국산화를 통한 기술 확보를 할 수 있다[1]-[3]. 또한, 사용자용 단말장치 및 PC용 GUI를 통해 측정 그래프 및 수치 모니터링에 관한 솔루션을 확보할 수가 있게 된다.

II. 본론

1. 면적선량계의 시스템 구조

본 논문에서 제안하는 의료 및 산업용 X-선 발생장치의 선량평가를 위한 면적선량계의 시스템의 전체적인 시스템의 구조는 그림 1과 같다.

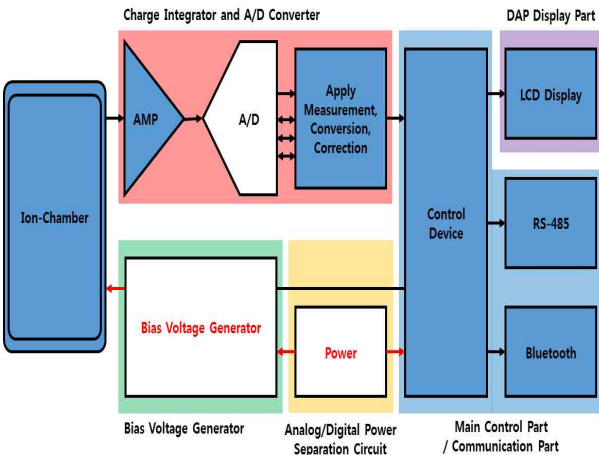


Fig. 1. Overall Schematic Diagram of DAP for Radiation Evaluation of Medical and Industrial X-ray Generator  
그림 1. 의료 및 산업용 X-선 발생장치의 선량평가를 위한 면적선량계의 구성도

2. 면적선량계의 하드웨어부

면적선량계의 하드웨어 구조는 전하 적분기 및 ADC부, 아날로그/디지털 전원분리 회로부, 주제어부/통신부, 바이어스 전압 발생부, 면적선량계 디스플레이부 등으로 구성된다.

2.1. 전하 적분기 및 ADC

전류 적분기를 내장한 20비트 ADC를 사용하였으며, 잡음의 영향을 줄이기 위해 기준 전압을 4.096V로 최대한 큰 값을 적용하였다. 측정 범위(dynamic range)를 늘리기 위해 적분 커패시터를 200pF/1%를 적용하였다. 전하 적분기 및 ADC 회로는 그림 2와 같다.

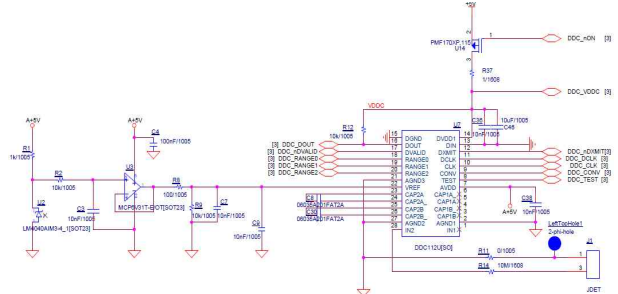


Fig. 2. Charge Integrator and ADC Circuit  
그림 2. 전하 적분기 및 ADC 회로

2.2. 아날로그/디지털 전원분리 회로

아날로그와 디지털 전원을 분리하여 잡음으로부터의 영향을 감소시킨다. 아날로그/디지털 전원분리 회로는 그림 3과 같다.

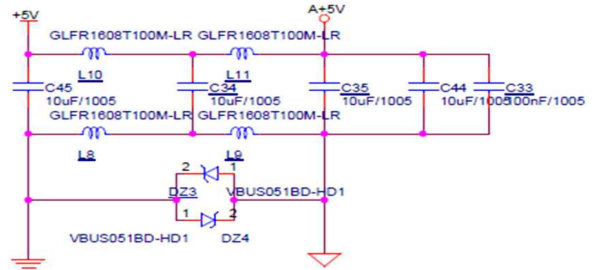


Fig. 3. Analog/Digital Power Separation Circuit  
그림 3. Analog/Digital 전원분리 회로

2.3. 주제어부/통신부

32bit/50MHz로 동작하는 Cortex-M0 MCU로 서버로부터의 명령을 받아 전류 측정 개신호를 발생시키고, 측정이 완료되면 값을 읽어와 기본적인 측정 편차 감소 조치를 취하고 서버로 결과를 보내는 역할을 한다. 클럭의 영향을 최소화하기 위한 동기화 회로와 50~300V의 바이어스 전압 발생을 위한 기준 신호를 생성하기 위해 12비트 PWM(Pulse Width Modulation) 신호를 0~2.5V의 스윙으로 바꾸어 최대치가 2.5V인 아날로그 신호 변환 회로 등이 포함되어 있다. 블루투스, 와이파이 통신 모듈을 탑재한 통합 제어 회로이다. 주제어부/통신부 회로는 그림 4와 같다.

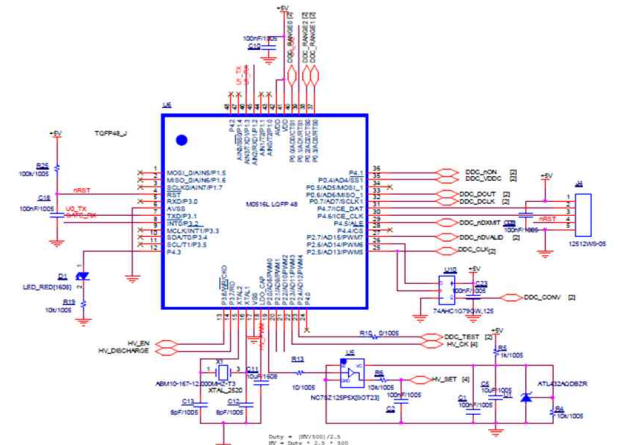


Fig. 4. Circuit of Main Control Part/Communication Part  
그림 4. 주제어부/통신부 회로

### 2.4. 바이어스 전압 발생부

면적선량계의 Ion-Chamber에 인가할 바이어스 전압발생부 회로로서, 초기에는 Bipolar 트랜지스터 사용해서 직접 스위칭 하는 방법을 시도한다. 각종 보호 기능 미비로 소자가 잘 망가지는 문제가 생겨 카메라의 플래시용으로 사용되는 IC와 트랜스를 사용하고 제어회로를 변형하여 적용한다. 제어 전압은 0 ~ 2.5V로 받으므로 전원전압이 4.5 V이상이면 안정된 고전압을 생성하도록 설계하였다. 출력전압이 320V가 되면 전력소비를 줄이기 위해 IC의 동작이 멈추도록 되어있어 300V 이하의 전압을 생성하기 위한 본 장비에는 적용에 문제가 없다. 출력 고전압에서 잡음을 줄이기 위한 필터 회로와 출력 전압을 정밀하게 조정하기 위한 회로 및 면적선량계의 기능을 멈출 때 Ion-Chamber의 전하를 빠르게 배출하기 위한 방전용 소자 회로 등도 설계되어 있다. 바이어스 전압 발생부 회로는 그림 5와 같다.

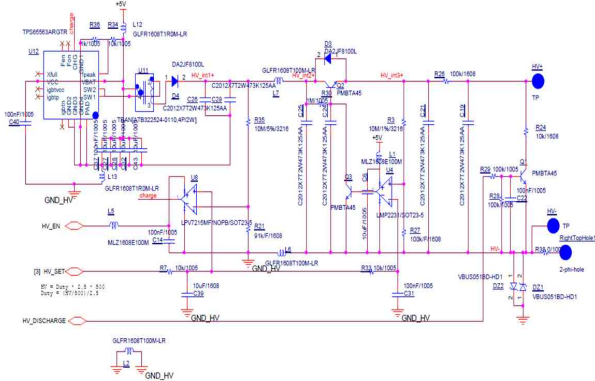


Fig. 5. Circuit of Bias Voltage Generator Part  
그림 5. 바이어스 전압 발생부 회로

### 2.5. 면적선량계 디스플레이부

제어 MCU로 Cortex-M4 사용하였고 Ethernet PHY와 함께 별도의 모듈로 자체 제작하였다. 전원은 자체 제작한 PoE 모듈 및 12V 어답터를 통해 공급받도록 한다. 원격 제어용 PC에서 측정 명령을 보내면 이를 중계해서 면적선량계 센서부로 보내고 면적선량계 센서부로부터 온 측정 결과를 LCD에 보여주며 UDP 패킷으로 PC로도 전송한다. 구현된 Ethernet 포트에 무선 AP의 브릿지 기능을 이용하면 무선랜을 통하여 데이터를 전송할 수 있다.

### 3. 미소 전류를 통한 누적선량 측정을 위한 고속 처리 알고리즘부

전류를 직접 측정하려면 나이퀴스트율(Nyquist Rate) 이상으로 샘플링해야 하므로 입력 신호를 제약(filtering)하거나 높은 속도의 샘플링이 필요하게 되어 정확도나 구현비용/전력소모 등에서 좋지 못하다. 따라서 입력 전하를 누적하여 평균전류를 구하는 방법을 사용하여 입력 손실 없이 낮은 구현비용/전력으로 측정이 가능하도록 구현하였다. 전하를 누적하는 두 개의 적분회로(누적 커패

시터 + Op Amp)를 교차로 동작시켜 입력 전하를 누적하며 커패시터 값으로는 12.5pF ~ 200pF를 사용하였다. AD 변화에는 4.096V를 기준 전압으로 20비트 변환하며 0.5msec ~ 0.5sec 단위로 누적하여 연속된 두 개의 값을 합하여 2개의 적분회로의 편차로 인한 오차를 제거하였다. 결과적으로 면적선량계 외부로는 1msec ~ 1sec 마다의 전하 누적치를 내보내게 된다. 전류가 일정하다고 가정할 경우 측정할 수 있는 전류의 범위(dynamic range)는  $CV=IT$ 로 계산된다[4].

### 4. X-선 발생장치의 동작에 동기화된 유무선 송수신 프로토콜부

장치 연결 설정, 바이어스용 고전압 등 초기 장치 설정과 측정 모드 설정, 적분 측정, 동작 제어에 관한 명령군으로 구분하여 각종 설정 명령은 명령/응답 쌍으로 처리하고 반복되는 고속 적분측정 동작에는 한 번의 연속실행 명령으로 반복적인 측정 결과를 면적선량계 보드에서 서버쪽으로 보내도록 한다. 이 방법의 장점은 어떤 동작을 얼마만큼 진행해야 하는지 미리 알기 때문에 시간이 물리적으로 측정 시간이 필요한 측정 동작과 데이터를 처리하는 동작을 별도의 하드웨어에서 동시에 진행할 수 있고, 데이터를 전송이 끝난 후 대기시간 없이 바로 다음 패킷을 준비할 수 있으므로 전체적인 대기 시간을 대폭 줄일 수 있게 된다.

### 5. 연동 및 에이징을 위한 PC 기반 제어 프로그램부

면적선량계의 X-선 발생장치와의 연동 테스트 및 장시간 에이징 테스트를 위하여 PC 기반 제어 프로그램을 개발하였다[5][6]. 측정값 그래프는 X-선 조사시 측정된 전류량을 그래프를 나타낸다.

### 6. 성능 실험

#### 6.1. 실험 방법

본 논문에서 제안한 그림 6의 의료 및 산업용 X-선 발생장치의 선량평가를 위한 면적선량계 시스템의 성능을 평가하기 위하여 공인시험기관으로부터 측정의 소급성이 확보된 X-선 조사장치를 이용하여 일부 영역이 차폐된 X-선을 측정기에 조사하고 Energy range/tube voltage와 센서 필드 간 감도차이를 측정 실험하였다.



Fig. 6. Full Hardware Image  
그림 6. 전체 하드웨어 이미지

**6.2. Energy range/tube voltage 실험 결과**

면적선량계에 대하여 서로 다른 세기의 X-선을 조사하였을 때 각각의 에너지 대역(30, 60, 100, 150kV)에서 전류의 변화에 따른 선형성을 갖는 것을 그림 7의 그래프로 확인할 수 있다. 따라서 에너지 대역이 커질수록 전류의 양이 선형적으로 비례하여 증가하기 때문에 면적선량계에 측정되는 값이 선형적으로 증가됨을 확인할 수가 있었다.

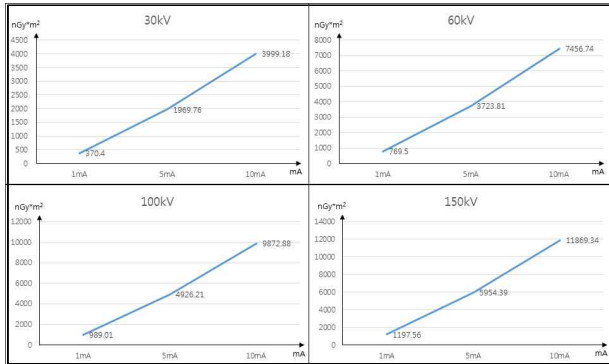


Fig. 7. Current Graph According to Energy Band  
 그림 7. 에너지 대역에 따른 전류 그래프

**6.3. 센서 필드 간 감도차이 실험 결과**

표 1에서는 면적선량계를 4등분하여 각 지점에 따라 동일한 선질의 X-선을 조사하였을 때 센서 필드 간 감도차이에 대한 실험 결과를 나타내었다. 실험결과에서 4등분한 지점에서 측정기의 지시치에 대한 표준편차가 ±1.25%를 나타내어서 본 논문에서 제안한 면적선량계가 위치에 관계없이 균일한 측정값을 나타냄을 확인하였다. 또한 ±4.2%의 불확도가 측정되어서, 국제 표준인 ±15% 이하에서 정상동작 됨이 확인되었다.

Table 1. Experimental Results on Sensitivity Difference between Sensor Fields

표 1. 센서 필드 간 감도차이에 대한 실험 결과

Sample	X-ray position	Reference X-ray dose (mGy/h)	Measured value (nA)	Uncertainty rate (%)
DAP-01	X-ray ANSI M150 10mA (Top right)	815.07	1.20	4.2
	X-ray ANSI M150 10mA (Top left)	815.07	1.17	4.2
	X-ray ANSI M150 10mA (Bottom right)	815.07	1.21	4.2
	X-ray ANSI M150 10mA (Bottom left)	815.07	1.19	4.2

**III. 결론**

본 논문에서 제안한 면적선량계는 Ion-Chamber를 이용한 면적선량 측정기술을 기반으로 일선 의료기관에서 사용되고 있는 진단용 X-선 장치에

의해 발생된 의료기관의 환자 피폭선량을 명확히 측정할 수 있다. 제안하는 면적선량계는 고가의 외국산 제품에 의존하고 있는 면적선량계 시스템의 국산화를 통한 기술 확보를 할 수 있으리라 기대된다. 제안된 시스템의 성능을 평가하기 위하여 공인 시험기관에서 실험한 결과, 각각의 에너지 대역(30, 60, 100, 150kV)에서 전류의 변화에 따른 선형성을 가져서 면적선량계에 측정되는 값이 선형적으로 증가됨을 확인할 수가 있었다. 또한 4등분한 지점에서 측정기의 지시치에 대한 표준편차가 ±1.25%를 나타내어서 면적선량계가 위치에 관계없이 균일한 측정값을 나타냄을 확인하였다. 한편, ±4.2%의 불확도가 측정되어서, 국제 표준인 ±15% 이하에서 정상동작 됨이 확인되었다. 향후 연구과제로는 측정 회로의 안정화 및 측정 불확도를 더욱 낮추는 방법에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

**References**

[1] Hart, D., D. G. Jones, and B. F. Wall. Estimation of effective dose in diagnostic radiology from entrance surface dose and dose-area product measurements. No. NRPB-R--262. National Radiological Protection Board, 1994.

[2] Le Heron, J. C. "Estimation of effective dose to the patient during medical x-ray examinations from measurements of the dose-area product." *Physics in Medicine & Biology* 37.11 (1992): 2117.

[3] Bogaert, E. V. E. L. I. E. N., Klaus Bacher, and Hubert Thierens. "A large-scale multicentre study in Belgium of dose area product values and effective doses in interventional cardiology using contemporary X-ray equipment." *Radiation protection dosimetry* 128.3 (2007): 312-323. DOI: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncm379>

[4] Jae-Eun Jung, et al. "Calibration Examination of Dose Area Product Meters using X-ray." *Journal of the Korean Society of Radiology* 11. 1 (2017): 37-42.

[5] Tae-Young Ko, Joo-Hyun Lee, Seung-Ho Lee. "Development of Neutron, Gamma ray, X-ray Radiation Measurement and Integrated Control System." *Journal of IKEEE* 21(4), 2017.12, 408-411. DOI: 10.7471/ikeee.2017.21.4.408

[6] Tae-Young Ko, Joo-Hyun Lee, Seung-Ho Lee. "Design of Total RMS(Radiation Monitoring System) for nuclear and nuclear medicine." *Journal of IKEEE* 21(2) 2017.6: 158-161. DOI:10.7471/ikeee.2017.21.2.158