JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지 Vol. 24, No. 12: 1711~1717, Dec. 2020

이온전리함 기반의 컨테이너 검색용 고에너지 X-선 선량 측정장치 개발

이정희[1] · 임창휘[2*] · 박종원[3] · 이상헌[4]

Development of High Energy X-ray Dose Measuring Device based Ion Chamber for Cargo Container Inspection System

Junghee Lee[1] · Chang Hwy Lim[2*] · Jong-Won Park[3] · Sang Heon Lee[4]

[1]Junior Engineer, Ocean System Engineering Research Division, KRISO, Daejeon, 34103 Korea
[2*]Principal Researcher, M1 International, Daejeon, 34326 Korea
[3]Principal Researcher, Ocean System Engineering Research Division, KRISO, Daejeon, 34103 Korea
[4]Chief Engineer, Daon, Daejeon, 34326 Korea

요 약

일반적으로 컨테이너 내부검사를 위해서는 최대 9MeV의 X-선을 사용한다. 이때 사용되는 X-선은 선형가속기를 통해 생성되며 일정한 세기의 X-선량이 시간의 변화에 관계없이 안정적으로 유지되어야 한다. 만약 발생되는 X-선의 세기가 일정하지 않다면 영상의 해상도와 대비도 등에 영향을 미칠 수 있으며 결과적으로 컨테이너 내부의 이상화물에 대한 검사에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 고화질의 영상을 획득하기 위해서는 발생되는 X-선 선량에 대한 지속적인 모니터링이 요구된다. 이와같은 선량 모니터링을 위하여, 본 연구에서는 고에너지 X-선 선량의 변화 측정을 위한 이온전리함 기반의 선량변화 측정장치를 개발하였고 환경변화에 따른 신호처리부의 성능변화를 확인하기 위하여 온도와 습도 변화에 의한 측정값의 변화를 관찰하였다. 또한, 고에너지 X-선 발생장치에서 발생되는 선량의 변화에 따른 응답특성변화를 측정함으로써 개발한 X-선 선량측정장치의 검증을 수행하였다. 측정결과 온도와 습도의 변화에 따른 성능의 차이가 크게 나타나지 않았으며 입사되는 선량의 변화에 따른 출력의 변화가 선형적이었다. 그러므로 개발한 이온전리함 기반의 선량변화측정장치는 고에너지 X-선의 선량변화의 측정에 적용하기에 적합함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

X-ray of up to 9MeV are used for container inspection. X-ray intensity must be maintained stably regardless of changes in time. If dose is not constant, it may affect the image quality, and as a result, may affect the inspection of abnormal cargo. Therefore, to acquire high-quality images, continuous dose monitoring is required. In this study, the ion-chamber based device was developed for monitoring the dose change in high-energy x-ray. And to estimate the performance of signal-processing device change according to the environmental change, the output changing due to the change of temperature and humidity was observed. In addition, verification of the device was performed by measuring the output change. As a result of the measurement, there was no significant difference in performance due to changes in temperature and humidity, and the change in output according to the change in exposure was linear. Therefore, it was found that the developed device is suitable for the dose monitoring of high-energy x-ray.

키워드 : 이온전리함, 컨테이너 검색시스템, X-선, 선형가속기
Keywords : Ion chamber, Container Inspection System, X-ray, LINAC

Received 28 October 2020, **Revised** 10 November 2020, **Accepted** 17 November 2020

***Corresponding Author** Chang Hwy Lim (E-mail : charlielim77@gmail.com, Tel : +82-42-719-7883)
Principal Researcher, M1 International, Daejeon, 34326 Korea

Open Access http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.12.1711 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

항만 컨테이너 차량의 내부검사를 위하여 일반적으로 고에너지 X-선을 이용한 방법이 가장 많이 사용되며 이를 위하여 MeV 에너지의 선형가속기(LINAC, Linear Accelerator)가 사용된다. 이와 같은 고에너지 X-선 발생장치는 양질의 X-선을 일정하게 발생시켜야 하며 이를 위하여 안정적인 출력이 보장되어야 한다[1]. 만약 X-선의 출력이 불안정하여 조사를 위한 X-선의 세기 및 에너지 크기가 불규칙하게 생성되거나 원하지 않는 크기 혹은 형태로 발생 된다면 영상의 해상도, 대비도, 투과력 등에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 그래서 피검사체인 컨테이너 내부의 의심물체에 대한 검사정확도를 감소시킬 수 있다[2-3]. 그러므로 양질의 고에너지 X-선원에 대한 정기적인 평가가 요구되며 이를 위하여 다양한 종류의 선량 모니터링 장치가 사용된다[4]. 선량 모니터링을 위한 장치는 X-선 빔의 발생 범위와 위치별 상대적인 선량에 대한 측정이 가능하여 X-선 발생용 선형가속기에서 발생되는 X-선 빔의 공간분포의 상대적인 변화를 측정함으로써 원하는 방향으로 X-선 빔이 발생되는 것을 확인할 수 있다[5]. 만약 원하지 않는 방향으로 빔이 조사되는 경우 산란 X-선의 증가나 빔과 영상검출기와의 정렬이 불완전 할 수 있으며 이는 영상의 질을 저하시키는 요인으로 작용할 수 있다[6]. 또한, 방사선 방호 측면에서는 방사선 방호시설의 방사선안전설계와 달리 원하지 않는 공간으로의 빔이 조사되는 현상을 실시간으로 확인함으로써 방사선 차폐공간 이외의 공간으로 방사선의 누설 가능성 평가할 수 있다. 이와 같은 고에너지 X-선 사용시설의 방사선 선량을 측정하기 위해서는 다양한 장치들이 사용될 수 있으나 고선량, 고에너지 방사선 환경에서는 이온전리함이 현재까지 가장 범용적으로 사용되고 있는 장치이다[7]. 이온전리함 기반의 선량 측정장치는 입사되는 방사선에 의해 내부의 공기가 이온화되는 과정에서 발생되는 전류를 측정하여 선량을 계측한다. 본 연구에서는 최대 9MeV 에너지의 X-선을 이용한 컨테이너 검색기용 선형가속기의 선량 변화 측정에 적용 가능한 선량 변화 모니터링용 이온전리함 기반의 X-선 선량 측정장치를 개발하였으며 개발한 측정장치를 이용하여 컨테이너 검색시설의 9MV 선형가속기의 선량 변화 측정에 적용 및 응답특성을 평가하였다.

Ⅱ. 본 론

2.1. X-선 산란변화측정용 이온전리함

본 논문에서 기술하고 있는 X-선 선량 변화 측정용 이온전리함은 그림 1에서 나타내고 있는 것과 같이 이온전리함로 입사되는 X-선과 감응하는 X-선 측정부, 수집된 신호를 변환과 전달을 수행하는 신호처리 및 전달부와 장치의 제어와 신호의 가시화를 수행하는 소프트웨어로 구성된다.

본 연구에서는 X-선 감응부를 구성하기 위해서 기체충진형 이온전리함을 제작하였다. 일반적으로 기체충진형 검출기는 사용 용도에 따라 인가되는 입력전압의 영역이 다르며 이에 따라 내부에서 발생되는 현상 또한 달라지게 된다. 이와 같은 영역은 재결합영역, 전리영역, 비례영역, GM영역, 연속방전영역의 총 5가지로 구분된다. 선량 측정용 이온전리함의 경우 전리영역의 전압을 사용함으로써 증폭없이 입사되는 X-선에 비례하게 전자를 생성하게 된다.

이온전리함의 내부는 그림 2에서 나타내고 있는 것과 같이 공기로 구성된 기체상태에서 양쪽이 극판으로 구성되며 양극판 사이에 전압을 인가하여 내부의 전기장을 형성하여 운영한다. 외부에서 유입되는 X-선이 전리함 내부의 기체와 반응하여 생성되는 이온쌍을 측정하여 입사되는 X-선 광자의 선량을 출력하게 된다.

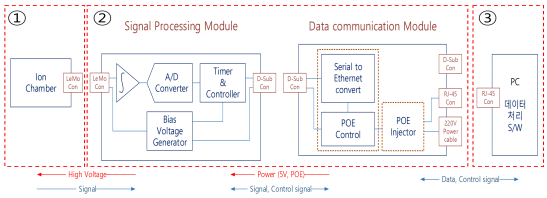

Fig. 1 The Configuration diagram of high energy X-ray dose measuring device; ① X-ray measuring part, ② Signal processing and transmission part, ③ Control & display GUI software

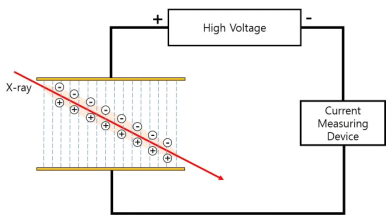

Fig. 2 A simplified diagram showing the operation of the ion chamber for X-ray dose measuring

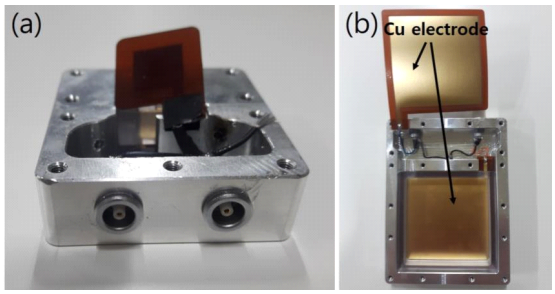

Fig. 3 The internal image of the developed ion chamber; (a) A small ion chamber with an active area of 10×10cm^2 used in the test (b) A large-area (active area 50×50cm^2) ion chamber having the same internal structure as a small-size ion chamber

이때 입사되는 X-선 광자에너지를 E라고 하면 생성되는 이온의 수 n은 광자에너지를 기체의 이온화 에너지로 나눈 값으로 나타내어질 수 있다. 이때 생성되는 전류의 크기는 아주 작으며 이를 측정하기 위해서는 전류증폭기를 이용하여 증폭된 전류를 측정하게 된다.

그림 3은 제작된 이온전리함을 나타내고 있다. 논문에서 시험평가를 위하여 반응면적이 10×10 mm^2 크기로 제작된 소형 크기의 X-선 선량 측정용 이온전리함(a)이 사용되었다. 이온전리함 내부의 양극판은 그림 (b)에서 나타내고 있는 것과 같이 FRP(fiber reinforced plastics) 기판 상단에 얇은 구리판으로 구성되며 이온전리함의 외부 하우징은 알루미늄으로 제작하였다. 여기서 그림 (b)는 소형 이온전리함과 동시에 제작된 이온전리함으로 시험평가를 위해 사용된 소형크기의 이온전리함 내부구조를 설명하기 위하여 인용하였다.

2.2. 이온전리함의 누적선량 측정용 신호처리장치

개발한 이온전리함의 전류측정은 이온전리함에서 출력되는 전하를 누적하여 평균전류를 구하는 방법을 이용하여 수행된다. 이를 연속적으로 수행하기 위하여 전하를 누적하는 두 개의 적분회로(누적커패시터 + OPA)를 교차로 동작시켜 입력 전하를 누적값을 획득하였다. 이때 200pF의 커패시터를 사용하였으며 AD변환은 4.096V를 기준 전압으로 20bit로 변환하였다. 입력되는 신호는 0.5msec ~ 0.5sec 단위로 누적하였으며 연속으로 측정된 두 개의 누적값을 합하는 방법으로 신호를 출력하였다. 그래서 두 적분회로의 사용으로 인하여 발생될 수 있는 편차로 인한 오차를 최소화하였다. 결과적으로 이온전리함에서 출력된 신호들의 누적값을 1msec ~ 1sec의 주기로 처리하여 외부로 전달하게 된다. 이와 같은 과정을 수행하기 위하여 신호처리부에서는 두 입력에 대한 적분과 ADC이 가능한 DDC112(Texas Instruments Inc., USA)를 사용하였다. 그리고 이온전리함의 운영을 위하여 최대 300V의 전압을 인가할 수 있는 전원공급회로를 구현하였다. 또한, 시스템의 컨트롤을 위한 메인제어장치는 Cortex-M4를 탑재한 STM32F407(STMicroelectronics, Switzerland)를 활용하여 구성하였으며 제어 및 디스플레이장치와는 이더넷 통신을 이용하여 정보의 전달을 수행할 수 있도록 구성하였다. 그림 4는 제작된 이온전리함의 누적선량 측정용 신호처리장치를 나타내고 있다. 그림에서 나타내고 있는 것과 같이 개발한 장치는 고선량의 방사선 사용시설 내부에서 사용된다. 그리고 선량을 측정하는 위치는 X-선 에너지가 가장 높고 가장 많은 선량을 발생시키는 1차 X-선이 조사되는 방향에서 측정이 이루어지기 때문에 신호처리부는 외부에서 유입되는 방사선에 의한 장치 훼손의 최소화를 위한 방안으로 20mm 두께의 납을 이용하여 관련 장치의 차폐를 수행하였다.

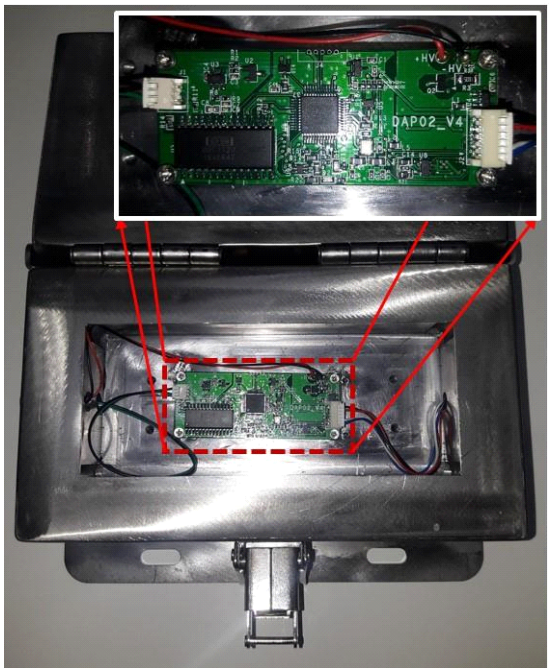

Fig. 4 Signal processing part for measuring and converting the current signal output from the ion chamber

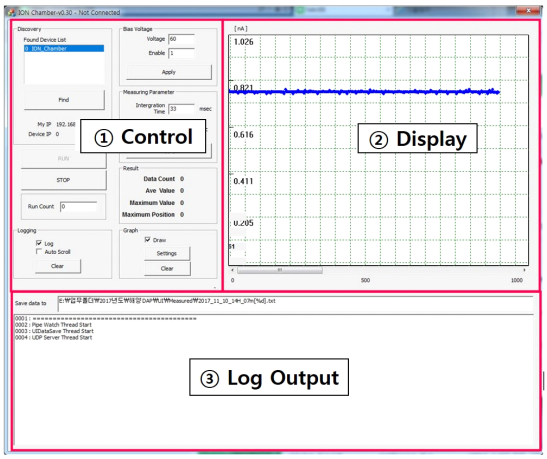

Fig. 5 GUI-based software for control and display of X-ray dosimetry equipment

2.3. 측정시험용 운영소프트웨어

이온전리함 운영을 위해 제작된 GUI 기반의 운영소프트웨어는 이온전리함에서 출력되는 신호를 획득하고 출력하는 전 과정에 대한 제어와 출력을 수행하기 위한 소프트웨어로 그림 5에서 나타내고 있는 것과 같이 GUI 기반의 소프트웨어는 기능별로 장치의 기능설정을 위한 ① 설정부, 운영과정에서 출력되는 정보를 표시하는 ② 디스플레이부 그리고 운영을 위한 이벤트들의 이력을 표시하는 ③ Log 출력부 등 총 3개의 파트로 구성되어 있다. 설정부는 이온전리함 운영을 위한 신호처리부를 제어컴퓨터와의 통신 설정, 동작전압 및 신호수집 시간 입력, 출력정보화면 설정, Log 출력부 설정 등의 시스템 및 소프트웨어 운영을 위한 설정을 수행할 수 있다. 데이터의 출력파일은 텍스트 파일 형태로 측정시간과 출력 전류값의 형태로 출력된다.

2.4. 이온전리함 신호처리장치의 성능검증

개발한 신호처리장치의 환경별 사용 적합성을 평가하기 위하여 3가지 항목(응답선형성, 온도, 습도)에 대한 응답특성평가를 수행하였다. 성능평가에 대한 검증의 객관성을 유지하기 위하여 성능시험인증을 전문적으로 수행하는 외부전문기관인 ㈜디티앤시에서 관련 시험을 수행하였다. 응답신호의 선형성 측정은 이온전리함에서 출력되는 전류신호를 인위적으로 모사하여 0.2 ~ 1.4nA 범위의 전류를 신호처리장치에 인가한 후 출력되는 값을 이용하여 수행하였다.

Fig. 6 Temperature and humidity change chamber(SH-624) for testing to perform performance change evaluation against the influence of external environment

그리고 온도와 습도의 변화에 따른 응답신호의 변화 측정은 입력되는 전류의 크기가 1nA일 때 온도의 경우 0, 20, 50도에서 측정하였으며 습도의 경우 70, 80, 90%로 습도를 변화하면서 응답신호를 측정하였다. 각 항목에 대한 측정시간은 60초이며 온도와 습도의 경우 시험환경의 온도 및 습도의 안정적인 유지를 위해 설정된 온도 및 습도에 도달 후 30분간 상태를 유지한 후에 응답신호를 측정하였다. 온도와 습도의 환경 유지를 위해 사용된 시험장치는 ‐40 ~ 150도까지 온도변화가 가능하고 30% ~ 95%까지 습도변화가 가능한 소형 환경시험용 챔버인 SH-624(ESPEC, US)를 사용하였으며 그림 6과 같다.

2.5. 이온전리함의 X-선 응답 성능평가

개발한 고에너지 X-선 선량측정장치의 응답특성평가는 선원의 최대 에너지가 9MeV에서 컨테이너 검색 내부영상을 획득할 수 있는 컨테이너 검색기 시설(KRISO, 광양, 대한민국)에서 수행하였다. 사용된 X-선 발생장치는 6MVp과 9MVp의 X-선 발생이 가능하며 최대 X-선 발생선량이 30Gy/min인 Varex®사의 Linatron Mi-9™을 이용하였다. 그림 7에서 나타내고 있는 것과 같이 빔 직경 5mm의 포인트빔이 조사될 수 있도록 납으로 제작된 원형 콜리메이터를 설치하였다. 개발한 시스템을 이용하여 발생되는 X-선에 대한 응답특성을 평가하기 위해서 X-선 발생장치의 발생원점과 측정장치 사이의 거리는 70cm로 설정하였다. 이와 같은 장치를 활용하여 이온전리함의 동작전압 설정과 입사 X-선량 대비 측정값의 응답신호를 측정하였다.

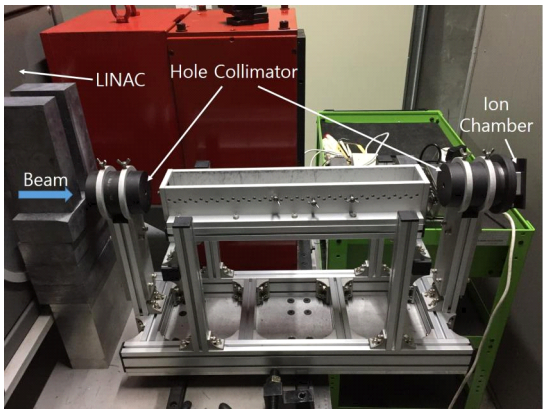

Fig. 7 An image of a test device consisting of an X-ray linear accelerator, a 5 mm diameter collimator, and an ion chamber for the performance evaluation

Ⅲ. 결과 및 논의

고에너지 X-선 선량측정장치의 신호처리장치의 환경변화에 따른 성능검증을 위해서 앞서 기술한 것과 같이 온도와 습도의 변화에 따른 응답성능의 변화를 관측하였다. 응답성능의 변화를 관측하기 이전 입력되는 전류의 변화에 따른 응답특성을 평가하였다. 그림 8은 입력전류(0.2 ~ 1.4nA)의 변화에 따른 출력전류의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 나타내고 있는 것과 같이 낮은 전류에서는 높은 전류에 비해 상대적으로 출력값이 낮게 나타났다. 하지만 높은 전류에서는 입력전류 대비 출력전류의 비가 유사하게 나타났으며 일정 전류(1nA) 이상에서는 미세한 수치지만 상황이 역전되는 현상이 발생하였다. 이와 같은 현상은 응답신호의 곡선이 선형적으로 증가하였기 때문에 후처리 과정에서 보정이 가능할 것으로 판단된다. 그림 9는 X-선 선량 측정장치의 온도변화에 따른 응답신호의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 나타내고 있는 것과 같이 상온에 비해 온도가 낮은 0℃, 20℃의 경우 상대적으로 출력값이 낮았으며 50℃에서는 입력전류에 비해 상대적으로 높은 전류가 출력되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 이와 같은 차이는 입력값인 1nA의 1.5% 이내의 차이로 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 습도의 경우 그림 10에서 나타내고 있는 것과 같이 50% ~ 90%의 범위에서 출력전류의 변화가 없었다.

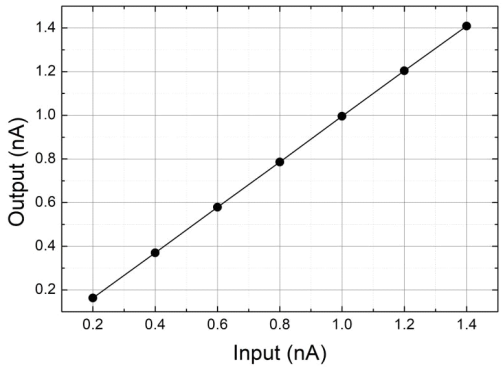

Fig. 8 A graph showing the change of the output current according to the change of the input current.

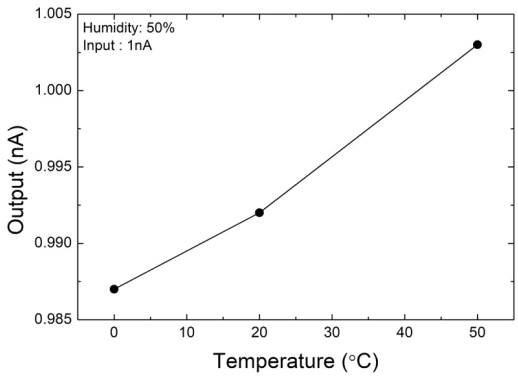

Fig. 9 The change curve of the output signal from the signal processing device according to the temperature change inside the test chamber.

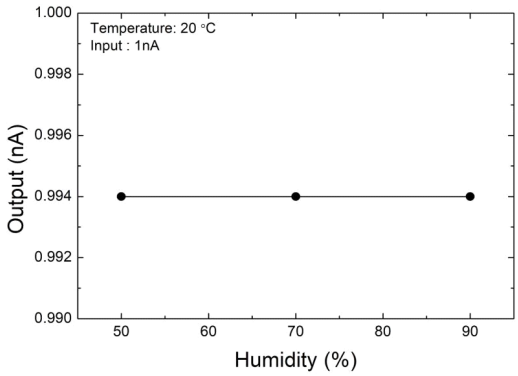

Fig. 10 The change curve of the output signal from the signal processing device according to the humidity change inside the test chamber.

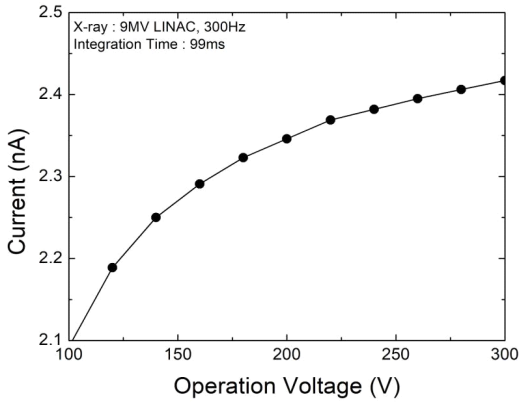

Fig. 11 The change curve of output current according to the change in operating voltage of ion chamber.

X-선 선량측정장치는 이온화 영역에서 입사되는 X-선을 측정하는 장치로 적절한 전압이 인가되어야 한다. 이를 위하여 개발한 고에너지 X-선 선량 측정장치의 인가전압의 변화에 따른 출력의 변화를 관측하였다. 이때 선형가속기의 X-선은 9MV의 출력으로 X-선을 발생시켰다. 그림 11은 인가전압변화에 따른 출력전류의 변화를 측정한 결과이다. 그림에서 나타내고 있는 것과 같이 인가되는 전압이 증가함에 따라 출력되는 전류 또한 증가하였으며 대략 150V에서 225V 사이에서 출력되는 전류 변화의 증가율이 크게 낮아짐을 확인할 수 있다. 이는 재결합 영역에서 이온화 영역으로 변화하는 과정으로 추정되며 이와 같은 이유로 개발한 고에너지 X-선 선량 측정장치의 인가전압은 250V 이상에서 운영하였다.

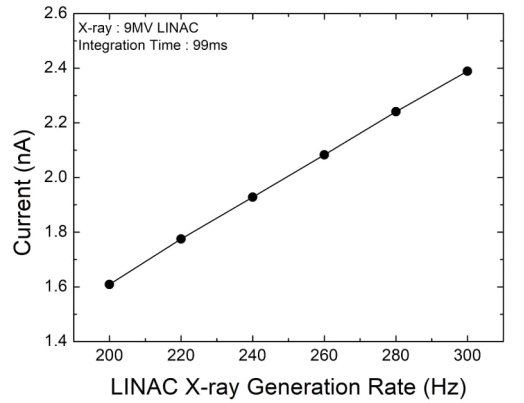

Fig. 12 A graph showing the change of the output current according to the change of the incidence rate of X-ray

개발한 고에너지 X-선 선량 측정장치는 앞서 기술한 것과 같이 이온전리함을 이용하여 선량을 측정하며 높은 에너지의 선량을 측정하기 때문에 입사되는 X-선에 따른 출력의 선형성이 보장되어야 한다. 이를 위하여 입사되는 고에너지 X-선의 입사량에 따른 출력결과를 평가하였다. 그림 12는 실험을 통해 관측된 입사 X-선 선량 변화에 따른 출력전류의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 나타내고 있는 것과 같이 입사되는 X-선 선량의 변화에 따른 출력전류의 응답은 선형적이었다. 이를 통해 개발한 장치는 고에너지 X-선의 선량 모니터링에 적합한 것을 확인할 수 있었다.

Ⅳ. 결 론

컨테이너 검색시설에서 X-선 선량 측정장치를 활용한 선량의 변화 측정은 앞서 서론에서 언급한 것과 같이 화질의 향상과 차폐의 최적화를 위해 필요하다. 본 논문에서는 X-선 선량 측정장치의 개발과 개발한 장치의 온도와 습도환경에서의 응답특성 분석, X-선 응답선형성에 대한 분석 등을 수행하고 이에 따른 평가 결과를 기술하고 있다. 본 논문에서 기술한 것과 같이 개발한 시스템은 고에너지 X-선 환경에서 선량 측정이 가능한 것을 확인할 수 있었으며 입사되는 X-선에 비례하여 출력이 선형적으로 변하는 것을 확인할 수 있었다. 현재 상대적인 선량변화는 측정이 가능하나 교정과정이 이루어지지 않아 방사선량으로 출력이 되지 않고 있는 부분을 보완하기 위하여 출력값을 선량으로 변환하기 위한 교정과정을 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant from National R&D Project of “Development of automatic screening and hybrid detection system for hazardous material detecting in port container” funded by Korea Institute of Marine Science and Technology Promotion (PMS4520)

REFERENCES

[1] J. Bendahan, “Vehicle and Cargo Scanning for Contraband,” *Physics Procedia*, vol. 90, pp. 242-255, 2017.

[2] G. Zentai, “X-ray imaging for homeland security,” *International Journal of Signal and Imaging Systems Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 13-20, 2010.

[3] G. Chen, “Understanding X-ray cargo imaging,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, vol. 241, pp. 810-815, Aug. 2005.

[4] M. K. Tyler, P. Z. Y. Liu, C. Lee, D. R. McKenzie, and N. Suchowerska, “Small field detector correction factors: effects of the flattening filter for Elekta and Varian linear accelerators,” *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, vol. 17, no. 3, pp. 223-235, May. 2016.

[5] J. Lee, I. Kim, J. W. Park, Y. K. Lim, M. Moon, S. Lee, and C. H. Lim, “Development of Diode Based High Energy X-ray Spatial Dose Distribution Measuring Device,” *Journal of Radiation Protection and Research*, vol. 43, no. 3, pp. 97-106, Sep. 2018.

[6] J. Lee, C. H. Lim, J-W. Park, I. Kim, M. Moon, and Y-K. Lim, “The Effect of Grid Ratio and Material of Anti-scatter Grid on the Scatter-to-primary Ratio and the Signal-to-noise Ratio Improvement Factor in Container Scanner X-ray Imaging,” *Journal of Radiation Protection and Research*, vol. 42, no. 4, pp. 197-204, Sep. 2017.

[7] D. A. Low, J. M. Moran, J. F. Dempsey, L. Dong, and M. Oldham, “Dosimetry tools and techniques for IMRT,” *Medical Physics*, vol. 38, pp. 1313-1338, Feb. 2011.

이정희(Junghee Lee)

2011년 2월 호서대학교 정보통신공학과 공학석사
2011년 3월 ~ 현재 선박해양플랜트연구소 해양시스템연구본부 시험기술원
※관심분야 : 항만보안검색, 항만IoT, 수중통신

임창휘(Chang Hwy Lim)

2012년 8월 부산대학교 기계공학부 제어자동화시스템전공 공학박사
2020년 6월 ~ 현재 ㈜엠원인터내셔널 책임연구원
※관심분야 : 항만보안검색, 방사선영상검출기, 방사선계측기, 방사선영상분석, 방사선전산모사

박종원(Jong-Won Park)

2006년 2월 아주대학교 전자공학과 공학박사
1997년 3월 ~ 현재 선박해양플랜트연구소 해양시스템연구본부 책임연구원
※관심분야 : 항만보안검색, 수중통신, 항만IoT, 선박 · 함정 시스템

이상헌(Sang Heon Lee)

1995년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 공학박사
2016년 5월 ~ 현재 ㈜다온테크놀러지 연구소장
※관심분야 : 방사선 계측기, 센서 회로 설계, 신호처리