JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Technical paper

16(4) : 505-511 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.4.505

저에너지 전자가속기 기반 악취 제거 통합 시스템 개발

김희수[1,2], 임윤묵[1], 윤진문[1], 김병남[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]성균관대학교 에너지과학과

Development of Integrated Odor Removal System Based on Low Energy Electron Accelerator

Huisu Kim[1,2], Youn-Mook Lim[1], Jin-Mun Yun[1] and Byungnam Kim[1,*]

[1]Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup 56212, Republic of Korea
[2]Department of Energy Science, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Republic of Korea

Abstract Low energy electron accelerators below 300 KeV are widely used accelerators for coating and curing. The use of low energy accelerators for the treatment of environmental pollutants such as odor removal has advantages in terms of maintenance cost and initial introduction cost compared to medium energy and high energy electron accelerators. The Advanced Radiation Technology Institute (ARTI) has developed a low energy electron accelerator based odor removal system using a spiral structure reactor and an electron accelerator of 200 KeV. Time synchronous analysis and control are possible by building and integrating equipment such as accelerators, gas meters, and flow meters to analyze the effects of various odor substances, electron beam irradiation conditions, ozone concentration, and temperature. Electron beam from the accelerator was induced into the exhaust gas containing hydrogen sulfide for odorous compound removal. The gas temperature and concentrations of hydrogen sulfide and ozone were monitored and analyzed by using implemented system.

Key words: Low energy electron accelerator, Integrated control system, Odor removal

1. 서 론

전자기장을 이용하여 하전입자를 가속하는 입자가속기는 1932년 Cockcroft-Walton 가속기를 이용하여 최초의 핵변환을 성공한 이후, 기초과학 연구뿐만 아니라 첨단과학 및 산업 분야에서 활발히 이용되고 있다. 그중 전자가속기는 재료가공(Materials processing), 비파괴 검사, 방사성 동위원소 생산, 물질 가교, 살균 등 산업적으로 널리 활용되고 있는 입자가속기로서 최근에는 전자빔 기반의 환경오염 물질 처리 분야에 관한 연구가 지속해서 수행되고 있다[1]. 환경오염 물질 처리 분야 중 악취 물질에 대한 처리 기술은 기존에 흡수, 화학 흡착, 바이오 필터 등의 방법 등이 사용됐으나 수명, 미생물 관리, 이차오염물질 발생 등 단점을 포함하고 있어 이에 대한 대안으로서 전자빔 기술이 연구되고 있다[2]. 전자빔의 에너지가 증가함에 따라 투과 깊이가 증가하는 특성으로 인해 대용량 처리가 필요한 배기가스 처리용 실증 전자가속기는 300 KeV 이상 1 MeV 이하 에너지 대역을 주로 이용하고 있으나 에너지의 증가에 따른 유지 비용과 초기 도입 비용 등의 단점이 존재한다[3].

100 KeV 이상 300 KeV 이하의 저에너지 조사 처리용 전

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry
*Corresponding author. Byungnam Kim
Tel. +82-63-570-3432 Fax. +82-63-570-3068, E-mail. bnkim@kaeri.re.kr
Received 14 October 2022 Revised 9 November 2022 Accepted 21 November 2022

자가속기는 투과 깊이를 고려하여 경화 박막 코팅 등에 주로 활용되고 있으며 고에너지 가속기와 비교하여 제작 및 운영 측면에서 단일 갭 가속 튜브만으로 가속 에너지를 확보할 수 있다는 점, 자체차폐가 가능한 점, 전자빔 스캐닝 장비 없이 면 조사가 가능하다는 점 등 산업적 이용에 있어 운영 및 경제적 장점이 존재하고 소형화 시스템의 장점으로 인해 기존 시설과 연동이 상대적으로 쉽게 가능하다는 점에서 중소형 시설에 활용할 수 있는 이점이 존재한다[4]. 원자력연구원에서는 나선형 구조 반응기를 활용하여 200 KeV 이하 대역의 저에너지 악취 제거 연구를 수행하고 있으며 다양한 유형의 악취 물질과 그에 따른 전자빔 조사조건, 오존 및 온도 등이 효율에 미치는 영향을 분석할 수 있도록 전자가속기와 가스 측정기, 유량계 등의 계측장비를 통합하여 제어 및 분석할 수 있는 시스템을 구현하였다. 구현된 시스템을 활용하여 출력 전자빔의 특성 및 오존 발생 추이, 기체의 온도 상승 등을 측정하였으며 황화수소를 포함하는 악취 가스에 전자빔을 조사하여 빔 출력에 따른 농도변화를 확인하였다.

2. 연구 대상 및 방법

2.1. 저에너지 전자가속기 악취 제어장치 하드웨어

Fig. 1은 저에너지 전자가속기 기반 악취 제어시스템의 구성도이다. 전자빔 조사 및 악취 물질 반응 처리는 방사선 차폐함 내부에 있는 반응기에서 이루어지며 저에너지 가속기의 전자빔은 반응기 상부 측에 있는 티타늄 포일을 통하여 내부에 전달된다. 장치에 이용된 저에너지 전자가속기는 최대 출력 200 KeV, 18.7 mA를 제공할 수 있으며 이때 6.2 kW의 전력이 필요하다. 전자빔의 인출방식은 파워 서플라이로부터 약 4.2 A의 전류를 공급받아 필라멘트 와이어

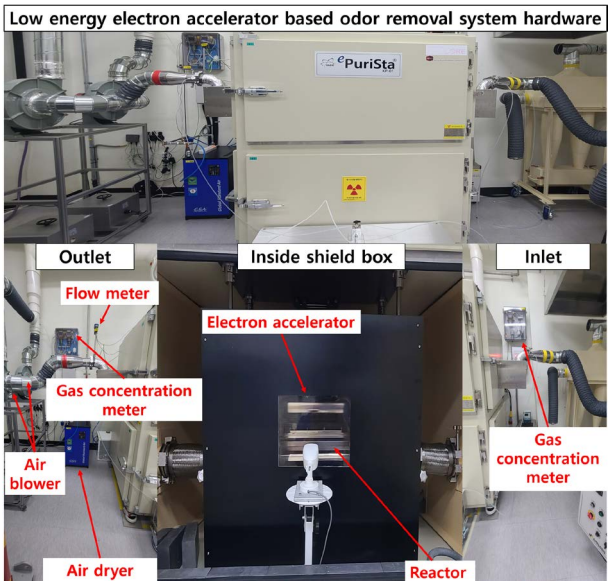

Fig. 1. Low energy electron accelerator based odor removal system hardware.

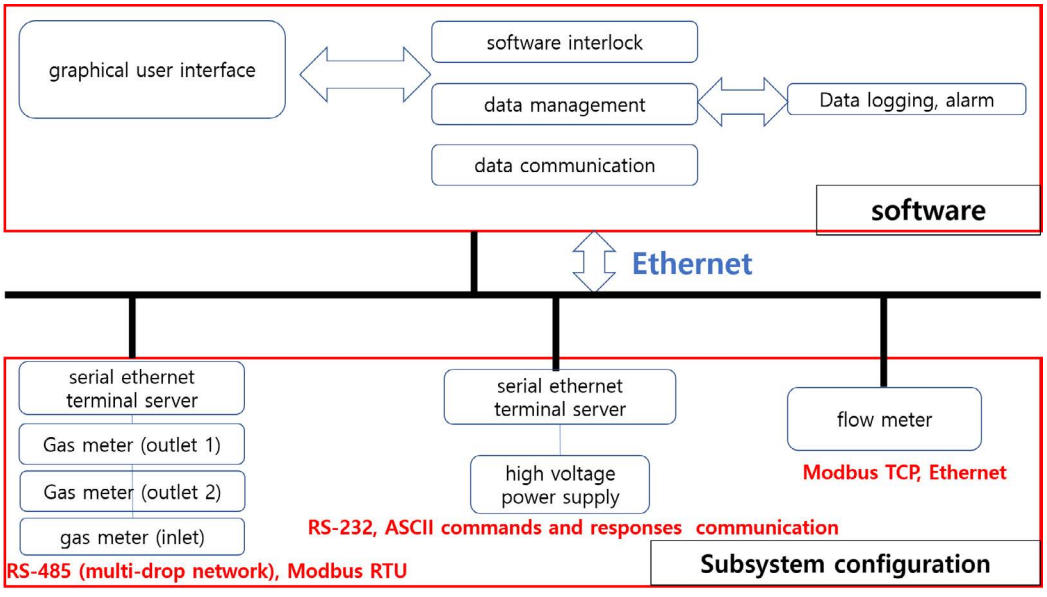

Fig. 2. Low energy electron accelerator based odor removal software data flow chart and configuration.

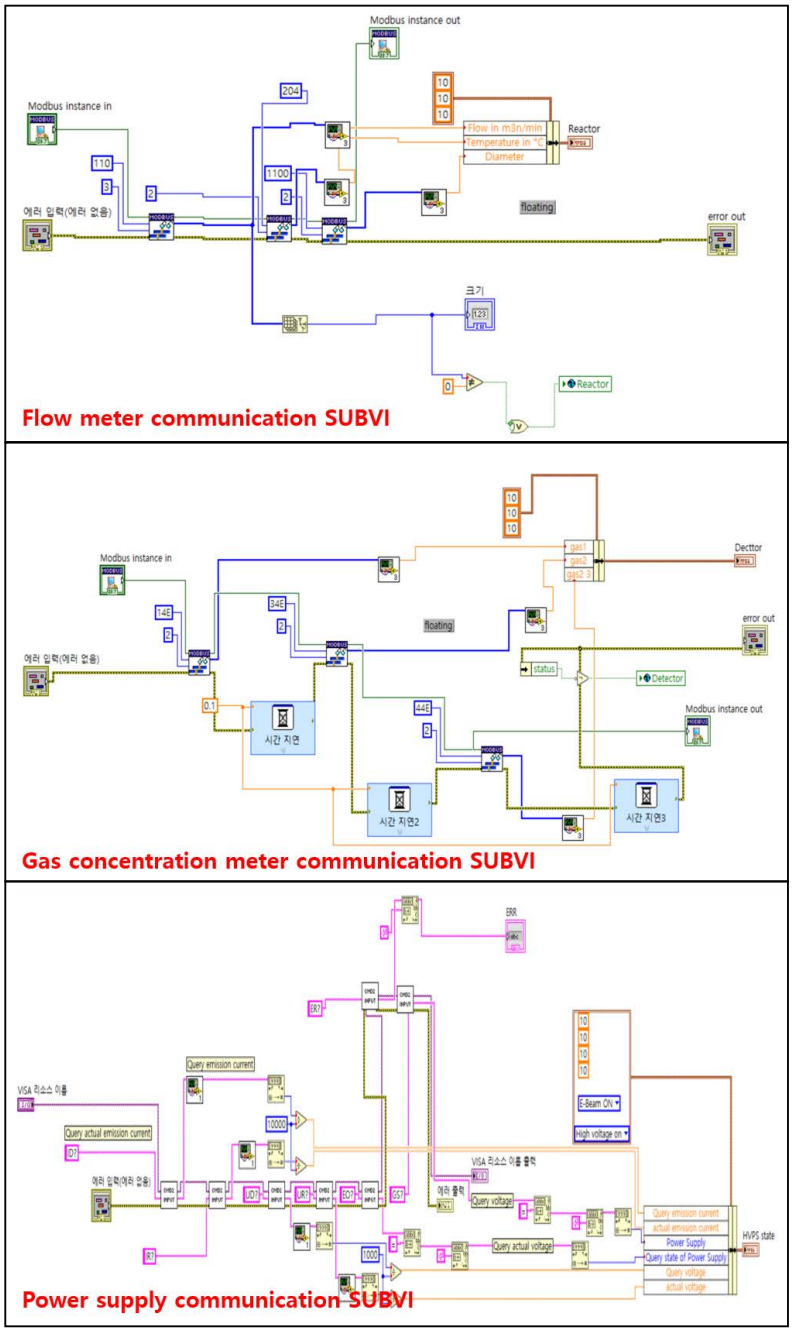

Fig. 3. Data transmission block diagram.

를 통해 전자를 방출하고 80 kV에서 200 kV의 고전압을 인가하여 전자빔을 가속한다.

티타늄 포일로 구성된 윈도우를 통과한 전자빔은 50 mm 대기에서 빔폭 175 mm 표면 선량 균일도 10%의 특성이 있으며 2대의 수냉 냉각기는 윈도우, 가속관 및 전원공급장치 구동 중 발생하는 열을 처리하도록 하였다.

저에너지 가속기의 윈도우 프레임을 통과한 전자는 반응기 상부측의 티타늄 포일을 통과하게 되며 이때 발생하는 열에 의한 손상을 방지하기 위하여 노점 4° 이하에서 구동되는 냉동식 에어 드라이어를 활용하여 차가워진 압축공기를 분사한다. 반응기 상부의 포일을 통과한 전자는 내부에서 나선형 구조를 통과하는 악취 물질(기체)과 반응하여 라디칼 및 이온을 형성, 결합이 이루어지게 되며 전자빔의 에너지에 따라 전자가 대기 중에 실제로 이동한 거리

를 뜻하는 CSDA (continuous slowing down approximation) 범위가 변화하며 200 KeV 전자의 경우 0.0508 g cm^{-2}이며 공기층밀도를 1.225 kg m^{-3}으로 가정 시 약 41.48 cm를 이동하게 된다.

전자선 처리 전후 악취 물질에 대한 농도 측정은 반응기 흡입구와 배출구에 있는 가스 측정기 (FIX 800, WANDI)에 의해서 계측되며 산업시설에서 발생하는 암모니아, 황화수소, 휘발성 유기 화합물을 제거를 위하여 입구 측 측정 가능 물질은 암모니아, 황화수소, 휘발성 유기화합물, 배출구는 암모니아, 황화수소, 휘발성 유기화합물과 전자빔 조사 시 발생하는 오존 측정을 포함하도록 설계하였다. 가스 농도 센서의 반응시간 (T90)은 30초 이내이며 진공 펌프를 이용하여 배관 내부의 가스를 흡입하는 방식으로 구현하였다. 펌프 유량은 7 L m^{-1}이며 흡입구로부터 배출구를 통하여 흐르는 기체는 병렬로 연결된 송풍기에 의하여 풍량을 제어하고 배출구 측 배관에 유량 측정기 (VP FLOWScpoe M)를 설치하여 기체의 유량과 온도 측정을 수행할 수 있다. 전자가속기로부터 발생한 방사선은 차폐물질로 제작된 함으로부터 외부와 차단되도록 제작되어 있으며 전자식 도어 개폐장치와 고전압 파워 서플라이를 인터락 시스템과 연동하여 차폐함 개방 시 전자선 발생을 할 수 없도록 하였다.

2.2. 저에너지 전자가속기 기반 악취 제어장치 소프트웨어

저에너지 전자가속기 악취 제어장치는 윈도우 기반 PC에서 NI LabVIEW 언어를 통하여 구현하였다. LabVIEW는 그래픽 프로그래밍 언어로 테스트 및 측정을 위한 자동화

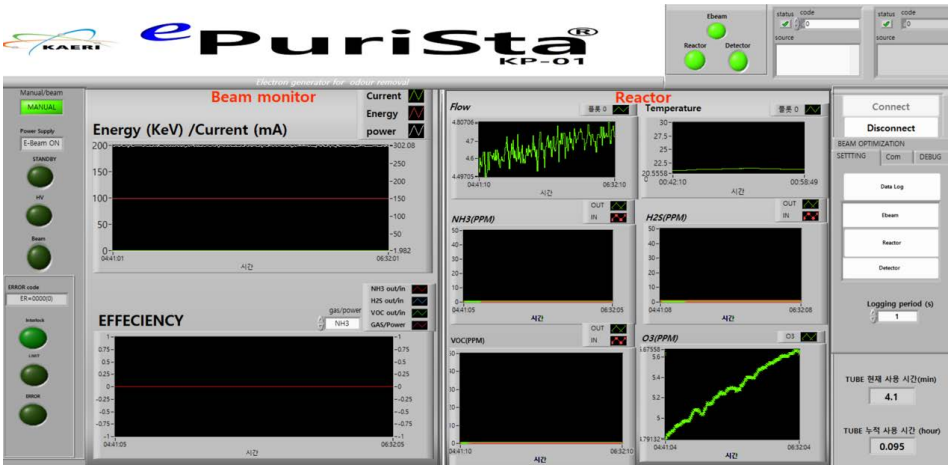

Fig. 4. Low energy electron accelerator based odor removal system graphical user interface.

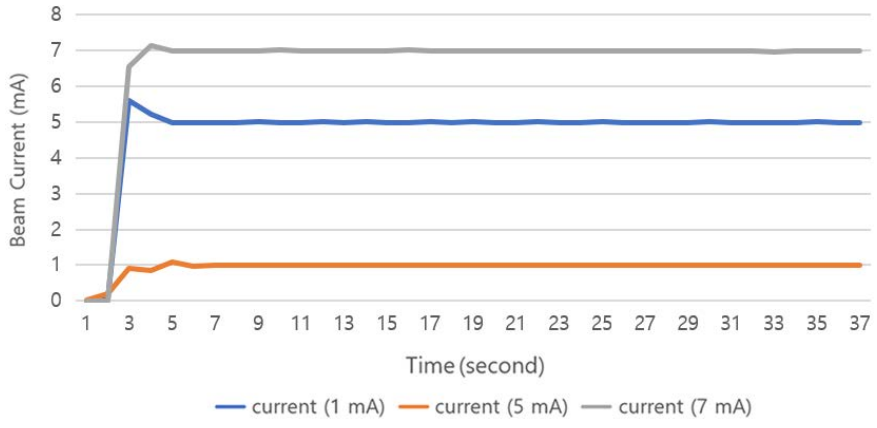

Fig. 5. Beam output characteristics in the time domain after setting the beam output.

시스템, 특히 가속기 및 실험용 제어시스템 구축에 활용되고 있는 언어이다[5-7]. 저에너지 전자가속기 기반 악취 제거 통합 시스템은 분석 목적과 이에 따르는 필요 계측장비 및 시스템 변경에 대응하기 위하여 광범위한 계측장비와 인터페이스를 제공하는 LabVIEW를 채택하였으며 제어소프트웨어의 프로그램 흐름은 Fig. 3과 같다. 저에너지의 가속기를 포함한 하위시스템과 PC와의 데이터 송수신은 이더넷 네트워크를 통하여 이루어진다. 투입구와 배출구에 있는 3대의 가스 측정기는 RS-485 프로토콜을 지원하여 멀티드럽기능을 활용하여 단일 RS-485 시리얼 포트를 통하여 3대의 통신을 수행할 수 있도록 구성하였으며 시리얼 통신데이터는 시리얼 디바이스 서버(NPORT 5190)를 이용하여 이더넷 네트워크로 변환하였다. 저에너지 전자가속기 고전압 공급 장치 또한 RS-232 프로토콜을 지원하며 동일한 방법으로 디바이스 서버를 활용하여 이더넷 네트워크에 접속할 수 있도록 구성하였으며 PC와 접속시 개별장비의 로컬 접속 및 점검을 고려하여 가상 시리얼 포트를 활용하였다.

유량 측정기는 모드버스 TCP 및 이더넷 포트를 지원하여 별도의 변환 없이 수동 IP를 설정하여 네트워크에 접속하도록 구성된다. 각각의 하위 시스템은 모드버스 RTU, TCP와 ASCII commands and responses의 데이터 통신 프로토콜을 지원하며 제어소프트웨어에 각각의 통신을 담당하는 하위 VI를 구현하여 데이터 송수신 과정을 수행하였다. 데이터 송수신 VI를 통해 전달된 투입구, 출입구의 악취 농도, 오존 농도 저에너지 전자가속기의 전류와 전원공급 장치 출력 등 실험 매개변수의 입출력 제어 및 감시는 글로벌 변수를 활용하여 복제되어 상위 VI에 전달된다. 전

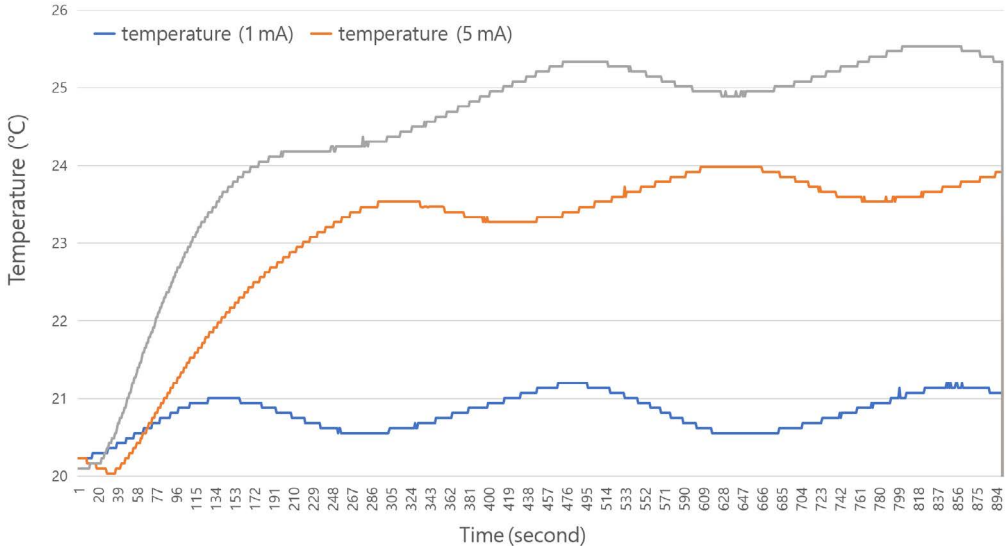

Fig. 6. Gas temperature change according to current output.

Table 1. System interlock list

Source	Condition	Response
High voltage power supply input	> 200 kV > 18 mA	200 kV (forced input) 18 mA (forced input)
High voltage power supply communication error	True	Accelerator stop (error code generation)
Power supply device status bit sum	True (abnormal)	Accelerator stop (error code generation)
Arcing inside the accelerator	True	Accelerator stop (error code generation)
Radiation shield box	OPEN	Accelerator stop (error code generation)

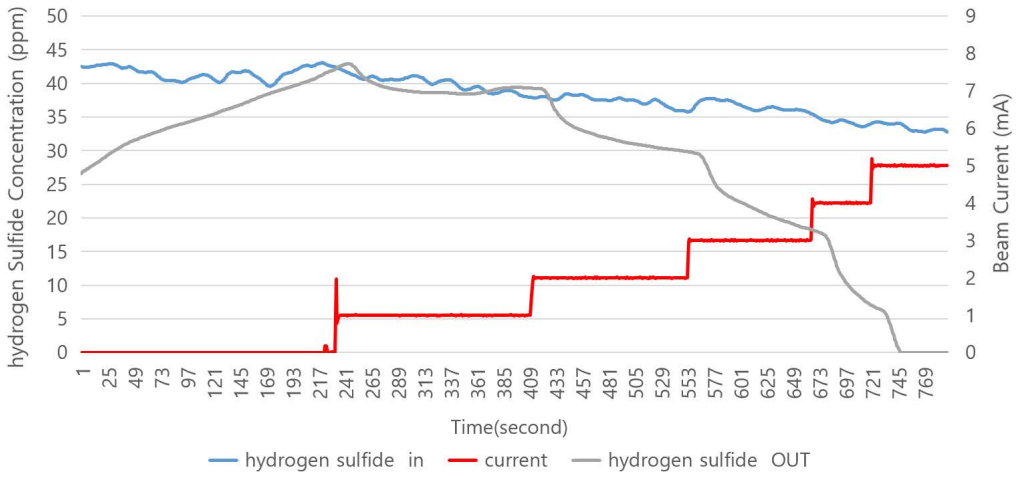

Fig. 7. Change in hydrogen sulfide concentration according to beam current output.

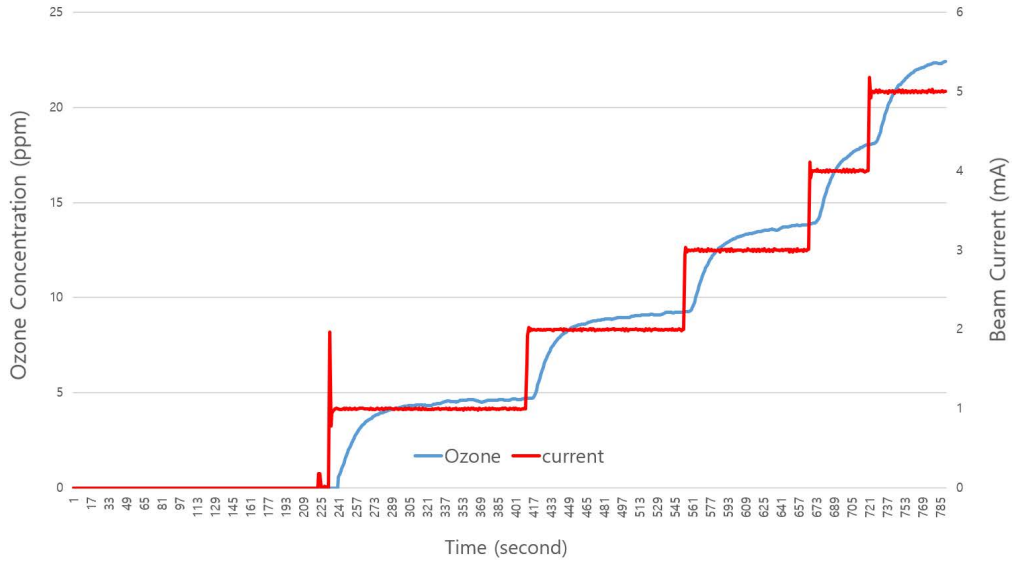

Fig. 8. Ozone generation due to change in beam current output.

자가속기 제어의 경우에는 통신 단절 및 운영자 에러를 방지하기 위하여 초기 접속 시 저에너지 전자가속기 하위제어기에 입력되어 있는 설정값을 소프트웨어 입력단과 동기화하였다.

가스 측정기와 유량 측정기 VI는 데이터 모니터링 기능만을 수행하며 각 VI 주요 변수는 MAIN VI에서 데이터 출력, 연산을 수행한다. 소프트웨어의 인터락 및 경고 알람은 기존 하드웨어 인터락 데이터와 소프트웨어상 구현된 소프트웨어 인터락을 포괄하여 관리하며 주요 인터락 파라미터는 Table 1과 같다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 구축된 저에너지 전자가속기 기반 악취 제거장치 소프트웨어의 그래픽 사용자 인터페이스이다. 4 Hz에서 실행되는 반복 루프를 통하여 저에너지 전자가속기의 전압, 전류, 인터락 정보와 반응기를 흐르는 기체의 온도, 유량 및 가스 농도를 포함한 실험 관련 매개변수 및 출력에 따른 개별 악취 물질의 농도, 농도 감소율 등을 사용자가 감시한다. 데이터의 저장 및 출력은 시간에 동기화하여 선택적으로 스프레드시트에 문자열로 변환하여 저장되며 가속기 수동 전압, 전류 인가, 프로그램 포트 설정 등의 조

작은 분할된 탭과 하위 패널 호출을 통해 이루어진다. 시스템의 출력 및 반응기 특성은 170 KeV에서 악취가스 투입이 없이 실험을 수행하였다. 전자빔 전류 설정에 따른 출력 특성은 Fig. 5와 같다. 1 mA에서 8%, 5 mA에서 12%, 7 mA에서 2%의 오버슈트 특성을 가지며 전류의 출력에 따른 배출구 기체 온도변화는 Fig. 6과 같이 출력에 비례하여 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 악취 제거시스템의 투입구에 황화수소가 포함된 오폐물에서 발생하는 가스를 송풍기를 통하여 투입한 후 전류 조건을 1 mA에서 5 mA까지 변화 시 배출구의 농도변화를 보여준다. 입력단의 황화수소 농도는 빔 출력과 무관하게 변화하지만, 출력단의 경우 빔 출력의 증가함에 따라 농도가 감소하며 5 mA에서 완전히 제거되었음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8을 통해 빔 출력과 비례하여 발생하는 오존의 농도 증가 추이를 확인할 수 있었다.

4. 결 론

저에너지 전자가속기 기반 악취 물질 제거 및 분석을 위하여 전자가속기를 포함한 계측장비의 구축 및 통합 제어 소프트웨어를 개발하였다. 시간에 동기화된 계측 및 전자가속기 제어가 가능하여 조사 중 선별적 관련 매개변수 측정이 가능하며 악취 물질별 분석이 가능하다. 현재까지 저에너지 전자가속기 기반 악취 제거 통합 시스템을 활용하여 개별 실험에 필요한 조사 조건 및 데이터 분석을 제공하고 있으며 향후에는 통합된 데이터를 바탕으로 변동하는 투입구 가스 농도에 최적화된 빔 출력 코드를 개발할 예정이다.

사 사

This work has been carried out under the Internal R&D Project of KAERI (Project No: 523110-22).

참고문헌

1. Hamm RW. 2009. Review of industrial accelerators and their applications. IAEA Proceedings Series.
2. Seo SH and Son Y-S. 2020. A Review on Decomposition Mechanism of Odorous Compounds Using Electron Beam Irradiation. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.* **36**:1-24.
3. Darsono. 2019. Application of electron accelerator for flue gas treatment of coal power plant to support green technology.
4. Mehnert R. 1996. Review of industrial applications of electron accelerators. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B: Beam Interact. Mater. At.* **113**:81-87.
5. Aleinikov VV, Borina IV, Krylov AI and Sychev KP. 2017. Using LABVIEW to build distributed control system of a particle accelerator. Proceedings of International conference on accelerator and large experimental physics control systems. https://doi.org/10.18429/JACoW-ICALEPCS2017-TUPHA128
6. http://www.ni.com/tutorial/7565/en/ for programming concept of LabVIEW code.
7. Patel M, Sakaamini A, Harvey M and Murray AJ. 2020. An experimental control system for electron spectrometers using Arduino and LabVIEW interfaces. *Rev. Sci. Instrum.* **91**:103104.