Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 20, No. 1, pp. 49-56, 2026
https://doi.org/10.23042/radin.2026.20.1.49

Original article

# 이동형 전자가속기를 이용한 환경 오염물질 처리 현장 실증 연구와 산업적 활용 가능성

김태훈[1,*] · 조상희[1] · 손지은[1] · 김탁현[1] · 김동우[1] · 채문식[1]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소 방사선융합연구부

# Field Demonstration Study on Environmental Pollutant Treatment Using a Mobile Electron Accelerator and Its Industrial Applicability

Tae-Hun Kim[1,*], Sang-Hee Jo[1], Jieun Son[1], Tak-Hyun Kim[1], Dong-Woo Kim[1], and Moonsik Chae[1]

[1]Radiation Fusion Research Division, Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup-si, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea

**ABSTRACT** Conventional treatment processes often struggle to completely remove recalcitrant organic pollutants and complex odors from environmental matrices. As a highly effective and field-applicable alternative, mobile electron-beam technology has emerged to facilitate on-site environmental remediation. This study details the system configuration and operational characteristics of the mobile electron accelerators developed by the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) and evaluates their performance through field demonstrations. In aqueous applications, the mobile e-beam system effectively degraded antibiotics, pesticides, and pathogenic microorganisms, verifying the feasibility of an integrated sanitation process at a field scale of 150 $m^3$/day. For livestock odor control, an integrated e-beam–biofilter system achieved high removal efficiencies for $NH_3$ and $H_2S$, consistently satisfying emission criteria under variable loading conditions. These field validation results demonstrate that mobile electron accelerators serve as a crucial proof-of-performance platform, successfully bridging the gap between laboratory-scale research and full-scale industrial deployment for advanced environmental applications.

**Key words:** Mobile electron accelerator, Field demonstration, Wastewater sanitation, Livestock odor reduction, Transportable Electron Beam System

## 1. 서 론

산업 구조의 고도화와 도시 인구 집중에 따라 하·폐수, 축산 폐수 및 대기 오염물질(NOx, SOx)의 발생은 지속적으로 증가하고 있다. 특히 의약물질, 잔류 유기화합물 및 과불화화합물(PFAS) 등 난분해성 미량오염물질은 기존 생물학적·화학적 처리 공정만으로는 완전한 제거가 어려워, 보다 강력하고 친환경적인 오염물질 처리 기술에 대한 요구가 커지고 있다. 전자가속기 기반 환경 복원 기술은 (1) 고에너지 전자가 오염물질과 직접 반응하거나, (2) 물의 방사분해 과정에서 생성되는 활성 라디칼을 통해 유기오염물질을 분해하는 원리에 기반한다. 이 기술은 화학약품 사용을 최소화하면서도 다양한 오염물질에 적용할 수 있는 장점을 지니고 있어 기존 환경 처리 공정을 보완하거나 대체할 수 있는 유망한 기술로 평가되고 있다[1].

국외에서는 방사능 보안 및 안전 문제로 인해 기존 감마선 조사 설비를 대체할 대안으로 전자선 기술이 크게 주목받고 있다. 특히 공간적 제약을 극복하고 기술의 현장 적용성을 극대화하기 위해, 미국 에너지부(DOE) 산하 국가핵안보국(NNSA)과 국제원자력기구(IAEA) 등의 주도하에 이동형 및 운반형 전자가속기 시스템 개발이 활발히 추진되고 있다[2-3].

이러한 정책적 흐름의 일환으로 IAEA는 운용 유연성이 뛰어난 전자선 기술의 국제적 보급을 위해, 2025년 한국 기술을 기반으로 한 컨테이너형 운반식 전자선 시스템(Transportable Electron Beam System, TEBA)을 성공적으로 구축하였다. 해당 시스템은 환경 복원, 소재 개질, 살균 등 다양한 분야의 방사선 처리 공정을 지원하며, 현재 회원국을 대상으로 한 기술 확산 및 실증 연구

**ISSN 1976-2402** **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2026 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Tae-Hun Kim
Tel: +82-63-570-3344, E-mail: thkim30@kaeri.re.kr

**Received** 28 January 2026 **Revised** 17 March 2026 **Accepted** 18 March 2026

의 사례로 적극 활용되고 있다[4].

환경 오염 복원 분야를 표적으로 한 구체적인 현장 적용 사례도 지속적으로 보고되고 있다. 수처리 분야의 경우, 브라질 원자력연구기관(IPEN/CNEN)이 트럭 탑재형 이동형 전자가속기를 산업 폐수 처리 현장에 직접 투입하여 실제 기업 환경에서의 실증 운전 데이터를 확보한 바 있다[5]. 또한 대기 환경 분야에서도 전자선을 이용한 배출가스 내 황산화물(SOx) 및 질소산화물(NOx) 제거 공정이 산업 플랜트 수준의 파일럿 스케일로 실증되었다[5]. 이와 같은 국외 사례들은 이동형 전자가속기 시스템이 단순한 실험실 규모의 검증을 넘어, 향후 과불화화합물(PFAS)과 같은 난분해성 미량오염물질을 제어하는 파일럿 스케일의 실제 처리 현장에도 효과적으로 도입될 수 있는 신뢰성 높은 시스템 임을 시사한다.

앞서 살펴본 국외의 실증 연구 도입과 같이, 전자선 기술의 적용은 뛰어난 처리 효율과 범용성에도 불구하고 국내에서는 주로 실험실 규모의 기초 연구에 머물러 있었다. 현장의 복잡한 조건과 오염 특성의 변동성으로 인해, 통제된 실험실 조건에서 확보된 결과를 실제 오염 현장으로 확장하는 데에는 뚜렷한 기술적·운영적 한계가 존재하기 때문이다. 결과적으로 실질적인 환경 문제 해결과 성공적인 산업화를 위해서는, 단순한 실험실 검증을 넘어 실제 현장 실증을 통해 축적된 운전 데이터와 공정 최적화 결과를 바탕으로 한 단계적인 기술 적용 전략이 필수적이다.

이러한 현장 적용의 한계를 극복하기 위한 현실적인 대안이 바로 “이동형 전자가속기”이다. 트레일러 형태로 설계된 이 시스템은 오염 현장으로 직접 투입이 가능하여, 현장에서의 즉각적인 시험 운전과 오염 특성에 맞춘 실시간 처리 조건 최적화를 수행할 수 있다는 큰 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 한국원자력연구원(KAERI)이 구축한 이동형 전자가속기의 시스템 구성과 현장 실증 연구 사례를 소개하고자 한다. 나아가 국내외 이동형 전자가속기 인프라 현황을 바탕으로 환경 분야에서의 실질적인 적용 가능성을 고찰하고, 이동형 전자선 기술이 방사선 기반 환경 산업에서 가지는 의의와 향후 발전 방향을 제시할 것이다.

## 2. 시스템 및 구성

### 2.1. 이동형 전자가속기 시스템 개요 및 구성 요소

이동형 전자가속기 시스템은 전자선 발생 장치(가속관 및 전자총), 고전압 전원공급장치, 냉각 시스템, 제어 패널, 그리고 방사선 차폐 구조체를 단일 이동 플랫폼에 최적화하여 집적한 통합 설비이다. 한국원자력연구원(KAERI)이 구축한 시스템은 대형 트레일러 탑재형으로 구성되었으며, 국제원자력기구(IAEA)의 TEBA 시스템은 ISO 표준 컨테이너 기반으로 설계되어 차량을 통한 견인 및 도로 운송이 용이하다. 본 시스템은 현장 도착 후 외부 전원과 지정된 오염원(폐수, 배기가스 등)의 배관 연결 등 최소한의 유틸리티 설치만으로 즉각적인 가동이 가능하도록 설계되었다.

특히 2010년에 제작된 한국원자력연구원의 1호 이동형 전자가속기는 도로 운송 시 적용되는 차량 총중량 제한(40톤 이하)을 준수하기 위해, 가속기와 차폐 체를 포함한 시스템 전체 중량이 약 29톤 규모가 되도록 최적화되었다. 이러한 하중 제약 하에서 최고의 효율을 내기 위해 0.6 MeV 이하의 에너지 대역에서 안정적인 빔 출력을 제공하도록 설계되었으며, 도로 주행 중 발생하는 진동과 충격으로부터 민감한 가속기 부품을 보호하기 위해 특수 무진동 시스템을 도입하였다. 비록 대형 고정식 시설에 비해 전자선의 투과 깊이는 상대적으로 얕으나, 현장의 오염 특성에 맞추어 가속 전압, 빔 전류 및 유체의 흐름 속도를 독립적으로 제어함으로써 오염물질 분해에 요구되는 충분한 흡수선량(Absorbed dose)을 확보할 수 있다. 아울러 전자빔이 대기 중으로 방출되는 조사창(Beam window)에는 열적 내구성이 뛰어난 티타늄(Ti) 호일을 적용하여 고출력 운전 시의 안정성을 높였다.

본 이동형 시스템의 핵심적인 기술적 이점은 대상 오염 매체(액상, 기상, 고상)의 특성에 따라 조사 반응기(Irradiation reactor)를 모듈형으로 신속하게 교체할 수 있다는 점이다. 기초 실험을 위한 회분식(Batch) 반응기 외에도, 하·폐수 및 미량오염물질의 연속 처리를 위한 얇은 수막 형태의 수처리 반응기나, 질소산화물(NOx) 및 황산화물(SOx) 저감을 위한 기체 반응기 등으로 유연한 결합이 가능하다. 마지막으로, 작업자의 방사선 안전을 완벽히 보장하기 위해 한국원자력안전기술원(KINS)로부터 장비의 인허가를 획득하였고, 가속기 내부에 방사선 감시 시스템(Radiation Monitoring System, RMS)을 구축하였다. 이와 함께 전자선 조사 시 공기의 방사분해로 인해 발생하는 오존($O_3$) 및 유해가스를 정화하는 활성탄 필터 기반의 환기·배기 시스템과, 비정상적인 출입문 개방 등 위험 상황 발생 시 즉각적으로 전원을 차단하는 다중 인터락(Interlock) 안전 회로를 통합하여 현장 운용 시의 안전성을 극대화하였다.

### 2.2. 국내외 설치된 이동형 전자가속기

#### 2.2.1. 한국원자력연구원

한국원자력연구원은 총 2기의 이동형 전자가속기를 보유하고 있다. 첫 번째 이동형 전자가속기(0.6 MeV, 33 mA)는 다양한 연구 적용을 목적으로 2대의 트레일러로 구성되어 있으며(Fig. 1), 2010년에 국내 최초로 제작되었다. 특히 환경분야에서는 수처리, 대기처리, 토양 및 지하수 복원을 위해 다양한 반응기를 제작하여 현장 실증 연구를 수행하였다. 두 번째 이동형 전자가속기(0.5 MeV, 3 mA)는 1대의 트레일러에 제어실과 가속기를 통합 탑재한 형태로 구성되어 있으며(Fig. 2), 대기오염물질 중 특히 축산악취 저감을 목적으로 2025년에 제작되었다.

**Fig. 1.** The first mobile electron accelerator of the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI).

**Fig. 2.** The second mobile electron accelerator developed by the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI).

**Fig. 3.** Containerized transportable electron beam system (TEBA) of the IAEA and its accelerator specifications [4].

**Table 1.** Specifications and configurations of mobile electron accelerators: KAERI and IAEA TEBA

| Category | KAERI 1st (2010) | KAERI 2nd (2025) | IAEA TEBA (2025) |
|---|---|---|---|
| Energy | 0.6 MeV | 0.5 MeV | 0.7 MeV |
| Beam Current | 33 mA | 3 mA | 28.5 mA |
| Beam Power | 19.8 kW | 1.5 kW | 20 kW |
| Mobility Configuration | Two-trailer separated system | Single-trailer system | Container-based transportable system |
| Main Applications | Various research applications (water treatment, air treatment, soil remediation, etc.) | Livestock odor reduction | Various research applications (NUTEC Plastics, Atoms4Food, Atoms4Climate, etc.) |
| Key Features | Korea's first mobile model | Integrated control room-accelerator system | Developed based on the KAERI 1st mobile electron accelerator |

#### 2.2.2. 국제원자력기구(IAEA)

국제원자력기구(IAEA)는 기존 감마선 조사 기술에 비해 운용 유연성과 현장 적용성이 우수한 전자선 기술의 국제적 확산을 적극적으로 추진하고 있다. 그 일환으로 2025년 운반이 가능한 전자가속기 시스템인 TEBA (Transportable Electron Beam System)를 구축하였다(Fig. 3). 이러한 전자선 시스템을 활용한 연구개발 활동은 방사선 기술의 평화적 이용 확대라는 IAEA의 정책 방향과 부합하며, 다양한 국제 이니셔티브를 다각적으로 지원할 수 있는 기반을 제공한다. 구체적으로 플라스틱 폐기물의 업사이클링 및 바이오 기반 플라스틱 생산을 목표로 하는 NUTEC Plastics, 식품 안전성 확보와 식물 병해충의 국제적 확산 방지를 위한 Atoms4Food, 백신 개발을 위한 미생물 비활성화 기술을 포함하는 ZODIAC 프로그램과의 연계 활용이 가능하다. 또한 하·폐수, 슬러지 및 악취 처리와 온실가스 저감을 포함하는 환경 분야의 Atoms4Climate 이니셔티브와도 높은 연관성을 가지며, 방사선을 활용한 문화유산의 보존·복원 및 생물학적 오염 제거 등 문화유산 보존 분야에서도 전자선 기술의 적용 가능성이 크다[4]. Table 1은 한국원자력연구원과 IAEA가 보유한 이동형 전자가속기의 주요 사양을 비교하여 나타낸 것이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 국외 전자선 기반 현장 실증 연구 사례

전자선 기술을 이용한 현장 실증 연구는 수처리 분야를 넘어 배출가스 및 난분해성 오염물질 처리 분야로 점차 확대되고 있다. 전자선 배출가스 처리(Electron Beam Flue Gas Treatment, EBFGT)는 황산화물($SO_2$)과 질소산화물(NOx)을 동시에 높은 효율로 제거할 수 있는 기술로 개발되어 왔으며, 다수의 파일럿 및 시범 설비가 운전된 바 있다[6]. 또한 Fig. 4와 같이 한국의 이비테크㈜가 제작한 이동형 전자가속기를 이용하여 사우디 아람코의 Jiddah에서 파일럿 플랜트 실험 결과 $SO_2$는 최대 98%, NOx는 최대 83%의 제거 효율이 확인되었고, 반응 과정에서 생성된 부산물은 농업용 비료로의 활용 가능성이 보고되었다[7].

미국에서는 Fermilab의 A2D2 (Accelerator Applications Development and Demonstration) 전자가속기 설비를 활용하여 PFAS (Poly- and Perfluoroalkyl Substances) 및 1,4-다이옥산과 같은 난분해성 오염물질을 전자선으로 분해하는 연구가 수행되고 있다. 해당 연구에서는 A2D2 유닛을 이용하여 PFOS (Perfluorooctane sulfonate) 및 PFOA (Perfluorooctanoic acid)의 제거

**Fig. 4.** Field experiment at the Jiddah Refinery in Saudi Arabia [6]. (1) stack of F 1001 boiler, (2) boiler F 1001, (3) flue gas duct, (4) pilot plant control room, (5) gas conditioning column, (6) pilot plant stack, (7) cartridge bag filter, (8) thermal insulated duct, (9) cyclone, (10) ammonia dosing unit, (11) mobile accelerator unit.

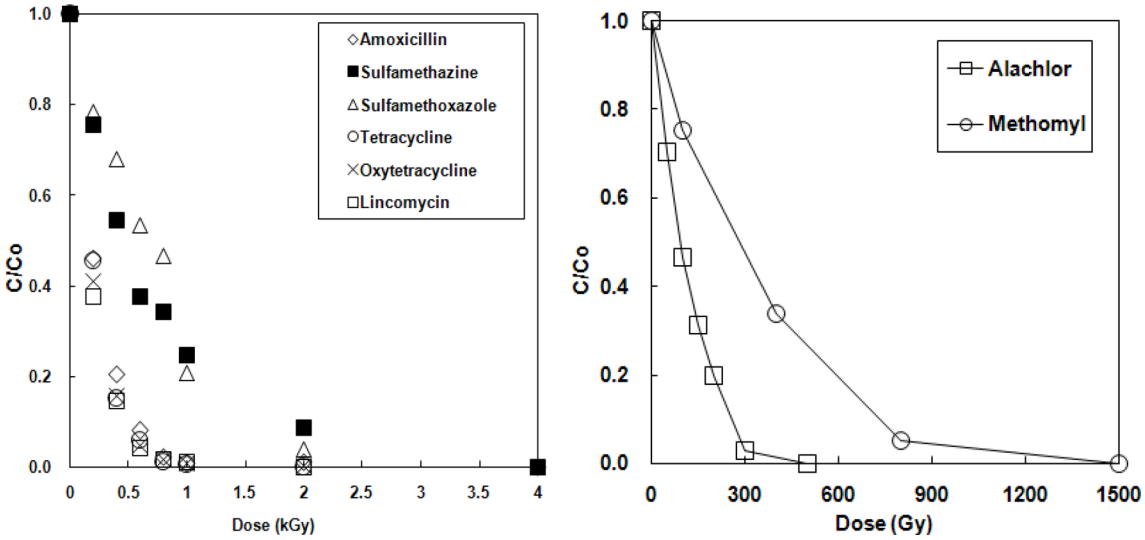


**Fig. 5.** Degradation of antibiotics and pesticides by radiation treatment [10].

효율과 최적 운전 조건을 평가함으로써, 전자선 기반 처리 기술의 현장 적용 가능성을 검증하고 있다[8-9]. 이러한 국외 연구 사례는 전자선 기술이 실험실 규모를 넘어 실제 환경 문제 해결을 위한 실증 단계로 진입하고 있음을 보여준다.

### 3.2. 국내 이동형 전자가속기를 이용한 현장 실증 연구 사례

#### 3.2.1. 수계 오염물질 처리 현장 실증 연구

한국원자력연구원은 항생제, 농약류 및 병원성 미생물과 같은 난분해성 오염물질의 효과적인 저감을 목적으로 방사선 기반 오·폐수 위생화 처리 기술을 실험실 규모부터 현장 실증 규모까지 단계적으로 평가하였다. 우선 항생제(Amoxicillin, Sulfamethazine, Sulfamethoxazole, Tetracycline, Oxytetracycline, Lincomycin) 및 농약류(Alachlor, Methomyl)를 대상으로 한 기초 처리 실험 결과, 흡수선량 증가에 따라 분해 효율이 향상되었으며 항생제류는 2~4 kGy, 농약류는 0.5~1.5 kGy 범위에서 완전 제거가 확인되었다(Fig. 5). 이러한 결과는 방사선 기술이 난분해성 유기독성물질에 대해 매우 높은 반응성과 저감 효율을 가지는 핵심 처리 기술임을 시사한다.

나아가 방사선 처리 조건에 따른 반응 특성을 평가한 결과, $N_2O$ 가스를 이용한 radical scavenger 조건에서 난분해성 오염물질의 분해 및 총유기탄소(Total organic carbon, TOC) 제거 효율이 현저히 증가하였다. 특히 40~60 kGy 조사선량에서 $N_2O$ 포화 조건의 항생제 수용액은 90% 이상의 TOC 제거율을 나타내어, 방사선 공정이 유기물의 단순한 구조 변환을 넘어 완전한 무기화(mineralization)에 효과적임을 확인하였다. Fig. 6에서 보는 것처럼 radical scavenger gas에 따른 TOC 제거 효과는 $N_2O > O_2 > Air > N_2$ 순으로 나타났으며, 산화제($Na_2S_2O_8$)를 병행

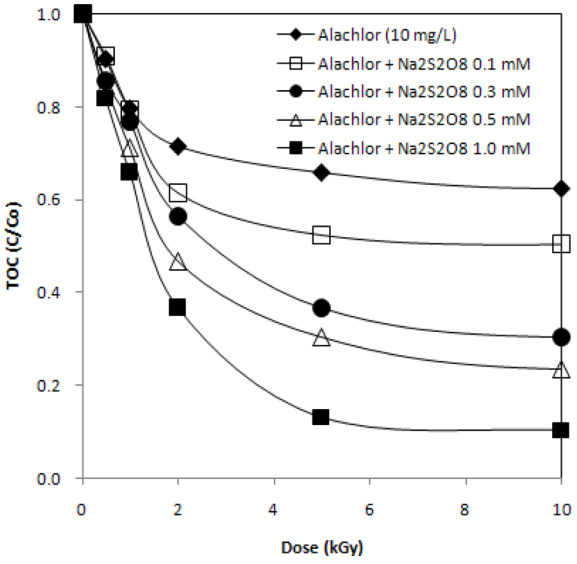


**Fig. 6.** TOC removal efficiency of alachlor by $Na_2S_2O_8$ addition.

적용할 경우 설페이트 라디칼이 생성되면서 제거 효율이 추가적으로 향상되었다[10].

이러한 방사선(전자선) 공정은 자외선(UV) 및 오존 등 타 고도산화공정(AOPs)과의 비교에서도 탁월한 경쟁력을 나타냈다. UV 및 오존 공정은 대상 물질이나 수질 조건(자외선 투과율 저하, 기-액 물질전달 한계 등)에 따라 처리 효율과 독성 변화의 편차가 크게 나타난 반면, 전자선 공정은 물질의 종류에 관계없이 안정적인 처리 효율을 보였다[11]. 특히, 실제 산업 현장 도입의 핵심 지표인 에너지 효율 및 경제성 측면에서도 전자선 공정은 자외선과 오존 공정에 비해 처리 효율 대비 소모되는 에너지가 소모가 적다는 것을 입증하였다. 1 $m^3$의 수계 내 오염물질 농도를 90%로 줄

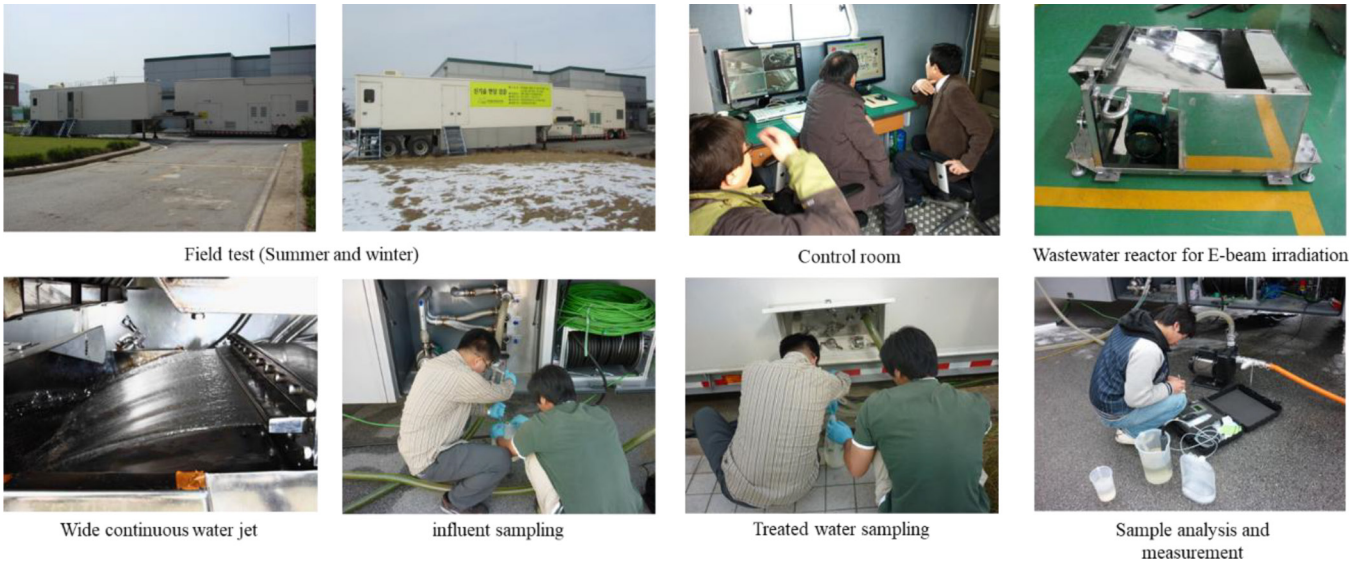


**Fig. 7.** Field demonstration study at the J municipal wastewater treatment plant using a mobile electron accelerator.

이는 데 필요한 전력량을 나타내는 EE/O (Electrical Energy per Order) 지표를 적용해 평가한 결과, 전자선 공정이 오존 및 UV-C 공정에 비해 전기적으로 가장 효율적이었다. 이는 물 분자의 방사선 분해(radiolysis)를 통해 수화전자와 하이드록실 라디칼 등의 반응종을 즉각적이고 다량으로 생성하여 오염물질 분해에 직접 관여하기 때문이다. 초기 가속기 인프라 구축 비용이 수반되더라도, 이와 같은 에너지 효율과 신속한 처리 속도는 전체 운전 비용(Operating cost)을 매우 절감시켜 상용화에 충분한 경제성을 제공 할 것으로 판단된다.

또한, 기술의 환경적 안전성 측면에서도 전자선 공정의 타당성이 입증되었다. 처리 후 생성되는 중간 부산물에 대해 수서생물 독성 시험(*Daphnia magna*, *Vibrio fischeri*, *Pseudokirchneriella subcapitata*)을 수행한 결과, 안정적인 독성 저감 효과가 확인되었으며, 특히 조류(*P. subcapitata*)를 이용한 평가에서 가장 일관된 독성 감소 경향이 관찰되었다[12]. 이는 방사선 처리 과정의 중간 생성물이 생태독성 측면에서 안전하거나, 연속적인 분해를 통해 독성이 원천적으로 제거되었음을 의미한다.

결론적으로, 실험실 규모의 연구를 통해 확인된 전자선 공정의 탁월한 분해 성능, 경제적 에너지 효율 및 환경적 안전성은 대규모 고정식 설비로의 격상(Scale-up)을 위해 필수적으로 요구되는 현장 실증용 이동형 시스템 개발의 기술적 타당성을 제공하였다. 이러한 연구 성과를 바탕으로 이동형 전자가속기를 이용한 150 $m^3$/일 규모의 하·폐수 방류수 위생처리 현장 실증 연구가 성공적으로 수행되었다(Fig. 7). 실증 결과, 이동형 전자빔 공정은 항생물질, 내분비계 장애물질, 병원성 미생물 및 독성을 동시에 저감할 수 있는 통합 위생화 기술로서 성능을 입증하였고 신기술 인증(제333호)을 획득하였다. 현장 직접 투입이 가능하고 에너지 효율성이 뛰어난 이동형 전자가속기 기술은, 향후 고정식 전자가속기 설비를 설치하는데 필요한 데이터 확보와 복잡한 수처리 현장에서 차세대 고도 산화·환원 공정으로서 중추적인 역할을 수행할 것이다.

### 3.2.2. 축산악취 저감 연구 및 실증 사례

축산시설의 대규모·집약화에 따라 암모니아($NH_3$), 황화수소($H_2S$), 메틸메르캅탄($CH_3SH$) 등 주요 악취물질의 발생량이 증가하고 있으며, 이는 축산시설 인근 지역의 생활환경 저하와 지속적인 악취 민원의 주요 원인으로 작용하고 있다. 기존 바이오 필터, 흡착 및 화학 세정 공정은 악취 농도 변동에 따른 처리 효율 저하와 유지관리 부담으로 인해 고농도 악취가 발생하는 축산 현장에 적용하는 데 한계가 있는 것으로 보고되고 있다. 이에 따라 악취 성상 변화에 대한 대응성이 높고 안정적인 운전이 가능한 새로운 처리 기술의 개발이 요구된다[13].

한국원자력연구원은 이러한 문제를 해결하기 위해 전자선 기반 축산악취 처리 통합 시스템을 개발하였으며, 본 연구 성과는 과학기술정보통신부가 주관하는 국가연구개발 우수성과 100선에 선정되어 기술적 완성도와 사회적 파급력을 인정받았다. 본 연구에서는 전자가속기의 에너지 특성과 흡수선량 조건에 따른 악취물질 처리 특성을 체계적으로 분석하고, 이를 기반으로 실규모 현장 실증을 통해 기술의 적용 가능성을 검증하였다.

현장 실증에 앞서 전자선 기술로 축산 악취 저감이 가능한지 전자가속기 에너지(0.2, 2.5 MeV)에 따른 단일 악취가스(암모니아, 황화수소, 메틸메르캅탄; 각 25 ppm)의 처리 효율을 회분식 실험으로 비교한 결과, 암모니아를 제외한 황계열 악취물질(황화수소, 메틸메르캅탄)은 전자선 에너지가 증가할수록 동일 흡수선

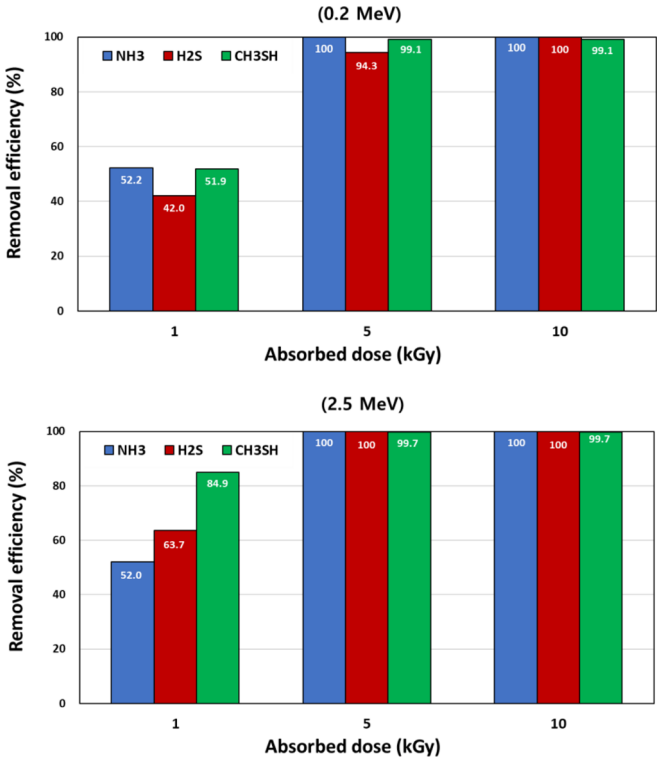


**Fig. 8.** Comparison of removal efficiencies of three odorous compounds as a function of absorbed dose for different electron accelerator energies.

량 조건에서 처리 효율이 향상되는 경향을 보였다. 특히, 흡수선량 5 kGy 이상에서는 가속기 에너지 종류와 관계없이 세 가지 악취물질 모두 94-100%에 가까운 처리 효율을 나타내어, 다양한 악취 조건에서도 안정적인 처리 성능이 확보됨을 확인하였다(Fig. 8).

실험실 규모 연구 결과를 바탕으로 Fig. 9에서 보는 것과 같이 J시 축산시설 현장에서 전자선-바이오 필터를 결합한 통합 시스템을 운전하여 주요 악취물질($NH_3$, $H_2S$) 및 전자선 분해 부산물(NOx, $SO_2$)에 대한 처리 성능을 평가하였다. 비육돈사 및 액비 발효조에서 포집한 가스($NH_3$: 90 ppm, $H_2S$: 3.5 ppm)를 대상으로 전자선 0~5 kGy 범위에서 1차 처리 후 바이오 필터를 통한 2차 처리를 수행한 결과, 최종 배출구 농도는 $NH_3$ 2 ppm, $H_2S$는 불검출(검출한계 0.05 ppm) 수준까지 감소하였으며, 처리 효율은 각각 97.8%와 98.6%로 나타났다. 또한 통합 시스템 적용 전 악취희석배수는 1,442였으나, 처리 후에는 300으로 감소하여 기타지역 배출허용기준인 500 이하를 만족하였다. 이는 전자선 기반 통합 시스템이 고농도 축산악취 조건에서도 배출 기준을 안정적으로 충족할 수 있음을 현장 실증을 통해 확인한 결과이다.

기존 바이오 필터 또는 화학 세정 공정은 악취 농도 변동에 민감하여 처리 성능의 불확실성이 발생하는 반면, 전자선 공정은 악취물질의 농도 및 조성 변화에 대한 대응성이 높고, 후단 생물학적 공정과 연계 시 분해 부산물의 추가 저감이 가능하다는 장점

**Fig. 9.** Field demonstration of a mobile electron accelerator-based system for livestock odor removal.

을 가진다. 특히 전자선-바이오 필터 통합 공정은 축산 현장과 같이 부하 변동이 큰 조건에서도 안정적인 운전이 가능함을 확인하였다.

### 3.3. 환경 분야에서 이동형 전자가속기의 역할 및 산업적 의의

본 연구에서 제시한 국내외 현장 실증 사례는 이동형 전자가속기가 실험실 규모 연구와 실규모 환경 적용 간의 간극을 해소할 수 있는 실증 중심 기술 플랫폼으로써 중요한 역할을 수행할 수 있음을 보여준다. 특히, 이동형 전자가속기는 막대한 초기 자본과 대규모 차폐 부지가 요구되는 고정식 가속기(Stationary Accelerator) 시설을 본격적으로 도입하기에 앞서, 현장의 다양한 환경적 변수와 오염물질 특성의 변동성을 반영한 최적 공정 설계 데이터(요구 흡수 선량, 유량, 전·후처리 공정 연계성 등)를 사전에 확보하기 위한 필수적인 '파일럿 플랜트(Pilot Plant)' 역할을 수행한다[14].

더불어, 지리적·공간적 제약으로 인해 대형 고정식 차폐 구조물 건설이 불가능한 산업 현장이나, 예기치 못한 환경 오염 사고로 인해 즉각적인 현장 복원 및 정화 처리가 시급한 구역에 신속하게 직접 투입될 수 있다는 점은 이동형 시스템만이 제공할 수 있는 독보적인 기술적 우위이다[15]. 이러한 이동형 전자가속기는 오염 특성의 변동성이 큰 실제 환경 조건에서 전자선 기술의 처리 성능, 운전 안정성 및 적용 한계를 체계적으로 검증할 수 있어, 전자선 기술을 활용하여 환경복원 관련신기술의 정책 반영 및 환경기준 설정을 위한 과학적 근거를 제공할 수 있다.

또한 이동형 전자가속기의 개발과 현장 활용은 전자가속기 기술의 국산화 및 방사선 기기 산업 기반 활성화 측면에서도 중요한 의의를 가진다. 기존 고정형 장치 중심의 제한된 수요를 넘어, 환경 재난 지역이나 인프라가 부족한 오지 등 다양한 특수 환경에 유연하게 대처할 수 있는 '수요처 맞춤형 모듈화 장비'라는 새로운 시장을 창출할 수 있기 때문이다. 현장 실증을 통해 축적된 운전 데이터와 처리 성능 결과는 향후 환경·에너지·보건 분야를 대상으로 한 상용화 설비 설계, 수출형 모델 개발 및 국제 협력 사업의 핵심 기초 자료로 활용될 수 있다. 특히 국제원자력기구(IAEA)의 운반형 전자가속기 구축 사례와 같이, 이동형 시스템

은 방사선 인프라가 취약한 개발도상국에서도 신속하게 도입하여 환경 문제를 해결할 수 있게 함으로써 기술 확산과 역량 강화 측면에서도 중요한 역할을 수행할 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 이동형 전자가속기의 시스템 구성과 운용 특성을 분석하고, 국내외 현장 실증 사례를 바탕으로 환경복원 분야에서의 실질적인 적용 가능성을 고찰하였다. 국외 사례를 통해 전자선 기술이 대기오염물질(황산화물 98%, 질소산화물 83% 저감) 및 난분해성 폐수 처리 분야에서 파일럿 스케일을 넘어 실질적인 산업 적용 단계로 확장되고 있음을 확인하였다. 특히 국내 실증 연구 결과는 이동형 전자가속기가 실제 현장 폐수에서 난분해성 오염물질들을 효과적으로 분해시키는 것을 입증하였다. 공공하수처리장에서의 실증에서는 0.5~4 kGy의 비교적 낮은 흡수선량만으로도 항생제와 농약류를 완전히 분해하였으며, 150 $m^3$/일 규모의 파일럿 플랜트 운전을 통해 타 고도산화공정(AOPs) 대비 우수한 에너지 효율(EE/O)과 생태독성 저감 효과를 확인하여 정부에서 인증하는 신기술 인증을 획득하였다. 또한, 고농도 축산악취 저감 현장 실증에서는 전자선-바이오필터 통합 공정을 적용하여 주요 악취물질($NH_3$, $H_2S$)을 97% 이상 고효율로 제거하고, 복합악취 희석배수를 배출허용기준 이하(1,442 → 300)로 안정적으로 저감하는 성과를 도출하였다. 이러한 결과는 전자선 기술이 단순한 실험실 규모의 검증을 넘어 현장 맞춤형 처리 조건 최적화가 가능한 실증 플랫폼으로서, 기술적 잠재력과 상용화 가치가 매우 높음을 시사한다. 이동형 전자가속기는 향후 대형 고정식 설비 도입을 위한 핵심 사전 설계 데이터를 제공하고, 방사선 기반 환경 기술의 산업화 및 국제원자력기구(IAEA) 등과의 국제 협력 확대에 중추적인 역할을 수행할 것이다. 추후 연구들은 확인된 실증 데이터를 바탕으로 현장 맞춤형 전자가속기 시스템 설계 및 전력 사용량 최소화 등의 연구가 지속되어야 한다. 아울러 기존의 물리·화학·생물학적 환경 처리 기술과의 하이브리드 공정 융합을 통해 이동형 전자가속기 기술의 경제성을 제고하고 그 적용 범위를 더욱 확장해 나갈 필요가 있다.

## 사 사

본 논문은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 '축산현안대응산업화기술개발사업(No. 321087-5)'과 한-아·태원자력공동연구지원사업(RS-2023-00283869)의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

## 참고문헌

1. Chmielewski AG, Sun Y, Wang J and Wang S. 2025. Emerging electron beam technology targeting hazardous micropollutants as quaternary treatment in wastewater treatment plants. *Sustainability* **17**(13):5963. https://doi.org/10.3390/su17135963.
2. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2021. Radioactive Sources: Applications and Alternative Technologies. Washington, DC, The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/26121.
3. U.S. Government Accountability Office. 2021. Alternatives to Radioactive Materials: A National Strategy to Support Alternative Technologies May Reduce Risks of a Dirty Bomb. GAO-22-104113. Washington, DC, U.S. Government Accountability Office.
4. International Atomic Energy Agency. 2025a. Transportable Electron Beam System. Vienna, International Atomic Energy Agency. Available from: IAEA official website. https://www.iaea.org/about/radioisotope-products-and-radiation-technology-section/transportable-electron-beam-system.
5. International Atomic Energy Agency. 2025b. Driving industrial innovation: Brazil's mobile electron beam accelerator. IAEA News. 17 December 2025. Available from: IAEA official website. https://www.iaea.org/newscenter/news/driving-industrial-innovation-brazils-mobile-electron-beam-accelerator.
6. Basfar AA, Fageeha OI, Kunnummal N, Al-Ghamdi S, Chmielewski AG, Licki J, Pawelec A, Tyminski B and Zimek Z. 2008. Electron beam flue gas treatment (EBFGT) technology for simultaneous removal of $SO_2$ and $NO_x$ from combustion of liquid fuels. *Fuel* **87**(8-9):1446-1452. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.09.005.
7. Pawelec A, Chmielewski AG, Licki J, Han B, Kim J, Kunnummal N and Fageeha OI. 2016. Pilot plant for electron beam treatment of flue gases from heavy fuel oil fired boiler. *Fuel Process. Technol*. **145**:123-129. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.02.002.
8. Lange C and Cooper C. 2024. Degradation of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFAS) in Water via High Power, Energy-Efficient Electron Beam Accelerator. Technical report. Maplewood, MN, 3M Company.
9. Londhe K, Lee C-S, Zhang Y, Grdanovska S, Kroc T, Cooper CA and Venkatesan AK. 2021. Energy evaluation of electron beam treatment of perfluoroalkyl substances in water: A critical review. *ACS ES&T Eng*. **1**(5):827-841. https://doi.org/10.1021/acsestengg.0c00222.
10. Korea Atomic Energy Research Institute. 2012. Development of Clean Environment Conservation Technology by Radiation. Daejeon: Korea Atomic Energy Research Institute.
11. Kim TH, Kim SD, Kim HY, Lim SJ, Lee MJ and Yu SH. 2012. Degradation and toxicity assessment of sulfamethoxazole and chlortetracycline using electron beam, ozone and UV. *J. Hazard. Mater*. **227-228**:237-242. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.038.
12. Kim HY, Yu SH, Lee MJ, Kim TH and Kim SD. 2009. Radiolysis of selected antibiotics and their toxic effects on various aquatic organisms. *Radiat. Phys. Chem*. **78**(4):267-272. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2009.01.010.
13. Jeong HB, JO SH, Son JE, Oh YH, Kim TH, Kim TH, Yu SH, Kim DW, and Jo YM. 2023. Removal of Ammonia, Hydrogen Sulfide, and Methyl Mercaptan as Livestock Odor Using a Low-energy (0.2 MeV) Electron Beam Accelerator. *J. Korean Soc. Atmos. Environ*. **39**(5):751-762.
14. Han B, Kim J, Kang W, Choi JS and Jeong KY. 2016. Development of mobile electron beam plant for environmental applications. *Radiat. Phys. Chem*. **124**:174-178. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.12.014.