

Evolution of Electromagnetic Radiation-Based Security Screening Technologies: A Technical Review for Drug Detection Simulant Development

Serim Hwang¹, Sunghyun Joo², and Jangoh Kim^{1,2,3*}

¹Department of Radiation Convergence, Inje University, Gimhae 50834, Republic of Korea

²Department of Radiation Convergence Chemistry, Inje University, Gimhae 50834, Republic of Korea

³Department of Radiological Science, Inje University, Gimhae 50834, Republic of Korea

(Received 19 March 2026, Received in final form 25 April 2026, Accepted 27 April 2026)

This study examines the development of X-ray-based imaging technologies employed for drug detection in security screening and compares the principles and limitations of each technology. While current airport security screening predominantly relies on conventional X-ray systems, recent advances have driven a transition toward detection systems integrating computed tomography (CT) with artificial intelligence (AI) algorithms. Conventional two-dimensional projection X-ray systems have limitations in precise drug detection due to object superimposition and difficulties in distinguishing organic materials with similar densities. In contrast, CT improves detection accuracy by analyzing material density and elemental composition in three dimensions based on Hounsfield units (HU) and the effective atomic number (Z_{eff}). Alongside these technological advances, the need for surrogate test materials—simulants—for AI algorithm training and performance evaluation has become increasingly prominent. This paper proposes the integration of high-resolution CT with drug detection-specific AI algorithms as a next-generation security screening system, based on a review of X-ray-based security screening technologies from X-ray imaging to CT.

Keywords : security screening, drug detection, simulant, X-ray Imaging, computed tomography, artificial intelligence

전자기방사선 기반 보안검색 영상 기술의 발전 동향: 마약탐지 시뮬런트 개발을 위한 기술적 고찰

황세림¹ · 주성현² · 김장오^{1,2,3*}

¹인제대학교 방사선융합학과, 경남 김해시 인제로 197, 50834

²인제대학교 방사선융합화학학과, 경남 김해시 인제로 197, 50834

³인제대학교 방사선학과, 경남 김해시 인제로 197, 50834

(2026년 3월 19일 받음, 2026년 4월 25일 최종수정본 받음, 2026년 4월 27일 게재확정)

본 연구는 보안검색 분야에서 마약 탐지에 활용되는 X-ray 기반 영상 기술의 발전 동향을 검토하고, 각 기술의 원리와 한계를 비교 분석한다. 현재 대부분의 공항 보안검색은 X-ray 장비를 중심으로 이루어지고 있으나, 최근에는 전산화 단층촬영(CT, Computed Tomography)과 인공지능(AI, Artificial Intelligence) 알고리즘을 결합한 탐지 시스템으로 발전하고 있다. 기존의 2차원 투영 방식 X-ray는 물체 간 구조적 중첩과 유사 밀도를 갖는 유기물 간 구별 한계로 마약 탐지 정확도가 제한된다. 반면 CT는 하운즈필드 단위(HU, Hounsfield Unit)와 유효 원자번호(Z_{eff})를 기반으로 밀도와 원소 조성을 3차원적으로 분석할 수 있어 탐지 정확도를 향상시킨다. 이러한 기술 발전에 따라 AI 알고리즘 학습 및 탐지 기술의 성능 검증을 위한 대체 시험 물질, 즉 시뮬런트 연구의 필요성도 논의되고 있다. 본 논문에서는 X-ray에서 CT로 이어지는 보안검색 영상 기술의 발전 동향을 분석하고, 고해상도 CT와 마약 탐지 특화 AI 알고리즘의 융합 필요성을 제시한다.

주제어 : 보안검색, 마약 탐지, 시뮬런트, X-ray 영상, 전산화 단층촬영, 인공지능

I. 서 론

보안검색 분야에서 불법 마약의 밀수는 항공·해상 물류망을 주요 운반 경로로 지속적인 증가 추세에 있다[1,2,8,16]. 유엔 마약 범죄 사무소(UNODC)의 세계 마약 보고서(2023)에 따르면 2021년 기준 전 세계 마약 사용자는 2억 9,600만 명으로 10년 전 대비 23% 증가하였으며, 육로 단속 강화로 항공·국제 우편·특송화물 경로로의 전환이 가속화되고 있다[1]. 이에 따라 공항 및 화물 시설은 고위험 밀수의 핵심 관문으로 주목받고 있다[1,2,8,16]. 동아시아 및 동남아시아 지역의 메스암페타민 압수량은 2024년 기준 236톤으로 전년 대비 24% 증가하였으며, 이 중 85%가 동남아시아에서 발생하였다[2]. 관세청 통계에 따르면 국내 항공을 통한 마약 밀반입 적발 건수는 2022년 142건에서 2025년 557건으로 약 5배 급증하였다[17]. 인천공항 단속 강화에 따라 지방 국제공항을 통한 우회 밀수도 동기간 311% 증가하였다[19]. 이러한 밀수 경로의 다변화는 기존 탐지 기술의 범위 확장과 기술적 보완이 필요함을 시사한다.

현재 대부분의 수하물 검사는 이중 에너지 X-ray 영상을 기반으로 보안검색 요원이 직접 관독하는 방식에 의존하고 있다[29]. X-ray 영상은 물질의 선형 감쇠계수 차이에 따른 투과 강도 변화를 기반으로 물체를 식별할 수 있어 금속성 위험 물질 탐지에는 효과적이다[27,32]. 그러나 마약류는 일반 식품·플라스틱 등과 유사한 유기물 특성을 가지기 때문에 감쇠 계수 기반 2차원 영상만으로는 식별이 어렵고, 구조적 중첩으로 인해 관독 오류 가능성이 증가한다[3,4,8,11,12]. 이러한 한계는 보안검색 요원의 숙련도 의존성을 높이며, 대량 화물 처리 환경에서 탐지 신뢰도를 저하시킬 수 있다.

이러한 문제를 보완하기 위해 도입된 CT는 다각도에서 X-ray 데이터를 기반으로 물체의 형태·밀도·위치를 3차원적으로 재구성함으로써 구조적 중첩 문제를 효과적으로 개선하였다[7,9,10,18]. 특히 이중 에너지 CT는 밀도가 유사한 물질 간 구별 능력을 향상시켰으나, 실제 항공 보안 환경에서는 처리 속도 확보가 우선되기 때문에 영상 해상도와 물질 식별 정밀도는 여전히 제한이 존재한다[3,7]. 또한 CT 영상만으로는 마약류의 화학적 조성까지 특정하기 어렵기 때문에, X선 회절(XRD)·X선 형광(XRF)·분광법 등 추가적인 화학적 분석 기법을 병행하고 있다[30,32,34].

최근에는 CT 영상에 인공지능(AI)을 결합한 자동 위험 탐지(ATD) 시스템이 개발되면서 관독 자동화 및 탐지 정확도 향상이 시도되고 있다[13,15,20]. 그러나 현재까지의 AI 기반 보안검색 연구는 폭발물 탐지에 집중되어 있으며, 유기물 기반 마약류 탐지에 대한 데이터셋 구축 및 모델 학습은 상대적으로 미흡한 실정이다. 특히 실제 마약류는 법적·안전적 제

약으로 인해 충분한 학습 데이터를 확보하기 어렵다는 근본적인 한계가 존재한다. 이러한 문제는 X-ray 및 CT 영상에서 물질의 물리·화학적 특성을 모사할 수 있는 표준화된 마약 탐지 시뮬런트 개발의 필요성으로 직결된다.

본 리뷰에서는 보안검색 분야 마약 탐지 기술을 단순한 장비 발전의 관점이 아니라, '탐지 대상 물질의 물리·화학적 특성 재현'이라는 관점에서 재해석하고자 한다. 이를 위해 2차원 X-ray에서 3차원 CT로 이어지는 영상 기술의 발전 흐름을 체계적으로 정리하고, AI 기반 CT 탐지 기술의 최신 동향을 분석한다. 또한 X선 회절·X선 형광·분광법 등 화학적 정밀 분석 기법을 통합적으로 고찰하여, 마약 탐지 시뮬런트 개발과 연계 가능한 기술적 고려사항과 향후 연구 방향을 도출하고자 한다.

궁극적으로 본 연구는 보안검색용 마약 탐지 시뮬런트의 설계 기준을 제시하고, AI 기반 탐지 시스템의 학습 데이터 확보 문제를 해결하기 위한 기술적 기반을 제공한다는 점에서 기존 리뷰와 차별화된 학문적 기여를 갖는다.

II. X선 기반 보안 검색 기술

보안검색 분야에서는 X선 기반 영상 기술과 함께 다양한 정밀 분석 기법이 병행되어 사용되며, 각 기술은 서로 다른 물리적 원리와 검출 특성을 가진다. 이러한 분석 장비들의 특성과 적용 범위를 종합적으로 비교하기 위해 주요 기술들을 Table I에 정리하였다. 이와 같은 특성을 바탕으로, 먼저 보안 검색에서 가장 널리 활용되는 X선 기반 영상 기술에 대해 살펴본다.

1. X-ray 기반 보안검색 기술

1.1. 단일 에너지 X-ray(Single-energy X-ray)

단일 에너지 X-ray(single-energy X-ray, SE X-ray)는 공항 보안검색에서 가장 기본적으로 사용되는 장비로, 1970년대 공항 수하물 검사에 도입된 이후 현재까지 널리 운용되고 있다[39,27]. SE X-ray는 단일 에너지 스펙트럼의 X-ray를 물체에 투과시킨 후, 검출기에 도달한 투과 강도를 측정하여 2차원 투과 영상을 생성한다[3,39,28]. 이때 영상 대비는 물질의 선형 감쇠계수 차이에 의해 결정되며, 감쇠가 큰 금속은 어둡게, 감쇠가 작은 유기물은 상대적으로 밝게 표현된다[8]. X-ray 감쇠는 광전효과와 콤프턴 산란의 상호 작용에 의해 결정된다[32]. 투과 강도는 Beer-Lambert 법칙에 따라 식(1)과 같이 표현된다[7,32]. 식(1)에서 I_0 는 입사 강도, I 는 투과 강도, $\mu(E)$ 는 에너지 의존 선형 감쇠계수, x 는 물질 두께를 의미한다[7,32]. 이 관계식은 X-ray 영상 대비 형성의 물리적 기초를 제공한다.

Table I. Comparison of drug detection technologies in security screening.

Technology	Principle	Key Advantages	Key Limitations	Application Stage
Single-Energy X-ray	Single-energy X-ray attenuation	Low cost; high throughput Fast inspection speed	Cannot distinguish similar density organics 2D structural overlap	Primary screening
Dual-Energy X-ray	Dual energy attenuation ratio (R-value)	Simultaneous Z_{eff} and density estimation Color mapping for efficient readout	No 3D information Limited detection of irregular drug forms	Primary screening
Raman Spectroscopy	Inelastic light scattering analysis	Non-contact analysis through packaging	Fluorescence interference from impurities Limited portable device sensitivity	Secondary confirmation
FT-IR	IR molecular bond vibration absorption spectrum analysis	Molecular fingerprint Non-destructive, Non-contact, Rapid analysis	Water vapor interference Difficulty detecting trace components in mixtures	Secondary confirmation
XRD	X-ray crystal lattice diffraction pattern	Molecular-level discrimination of similar-density organics	Slow analysis speed Not applicable to amorphous materials	Secondary confirmation
XRF	Characteristic fluorescent X-ray measurement under high-energy X-ray irradiation	Non-destructive, non-contact Rapid elemental composition analysis	Limited direct detection of organic main components	Secondary confirmation

$$I = I_0 e^{-\mu(E)x} \quad (1)$$

SE X-ray의 주요 한계는 밀도와 두께가 유사한 물질 간 구별이 어렵다는 점이다[16]. 마약류는 밀가루, 설탕 등과 유사한 감쇠 특성을 가지기 때문에 단일 에너지 영상만으로는 식별이 제한된다[32]. 또한 수하물 내 물체 간 구조적 중첩으로 인해 은닉 물질 식별이 어려워지며, 이는 판독 오류와 탐지 신뢰도 저하로 이어진다[3,11,12,16,26,27].

1.2. 이중에너지 X-ray(Dual-energy X-ray)

이중 에너지 X-ray(dual-energy X-ray, DE X-ray)는 서로 다른 두 에너지 영역에서의 감쇠 특성을 비교하여 물질을 구별하는 기술로, 현재 국제공항의 90% 이상에서 활용되고 있다[3]. DE X-ray는 저에너지 및 고에너지 영역에서 측정된 선형 감쇠계수를 이용하여 감쇠비 R 을 계산하며, 이는 식(2)와 같이 정의된다.

X-ray 감쇠 차이를 분석한다[3,5,23]. 감쇠비 R 값(Attenuation Ratio)을 분석하여 물질의 유효 원자번호(Z_{eff})와 밀도를 동시에 추정할 수 있다[8,16,27]. 식(2)는 두 에너지 영역에서 감쇠비로 정의되는 R 값을 나타낸다.

$$R = \frac{\mu(E_{low})}{\mu(E_{high})} \quad (2)$$

식(2)에서 $\mu(E_{low})$ 와 $\mu(E_{high})$ 는 각각 저에너지 및 고에너지

조건에서의 선형 감쇠계수이다. 감쇠비 R 은 물질의 유효원자번호 Z_{eff} 와 밀도에 의존하며, 이를 통해 물질의 조성을 추정할 수 있다. 일반적으로 $Z_{eff} < 10$ 인 물질은 유기물, $Z_{eff} > 10$ 은 무기물로 분류되며, 보안검색에서는 색상 매핑을 통해 시각화된다[27,28].

이중 에너지 X-ray는 단일 에너지 X-ray 대비 마약 탐지에서 물질 구별 능력은 개선되었으나 근본적인 한계가 여전히 존재한다[32]. 첫째, 영상이 2차원에 국한되어 수하물 내 물체의 3차원 위치 및 형태 정보를 얻을 수 없다[16,26,28,32]. 즉, 물체가 서로 겹쳐 있거나 수하물 구조가 복잡할 경우 2차원 영상만으로는 정확한 식별에 한계가 있다[26,27,32]. 공항 보안검색 시 X-ray로 판독한 2차원 영상의 예는 Fig. 1과 같다[33]. 둘째, 유효 원자번호(Z_{eff}) 범위가 겹칠 경우, 마약류와 일반 플라스틱 또는 식품 간 구분이 명확하지 않다[22,23,32]. 이러한 한계를 극복하기 위해 최근에는 X-ray 영상에 인공지능 분석 기술을 결합하여 판독 정확도를 높이려는 연구가 활발히 진행되고 있다[29].

1.3. AI 결합 X-ray(AI-based X-ray)

X-ray 영상에 인공 신경망(ANN, Artificial Neural Network)을 적용하여 보안 검색에 활용하려는 시도는 1990년대부터 시작되었다[28]. 초기 연구에서는 후방산란(Backscatter) 및 투과(Transmission) X-ray 영상의 강도와 기하학적 정보를 인공 신경망에 입력하여 마약류 자동 판별의 가능성을 제시하였다

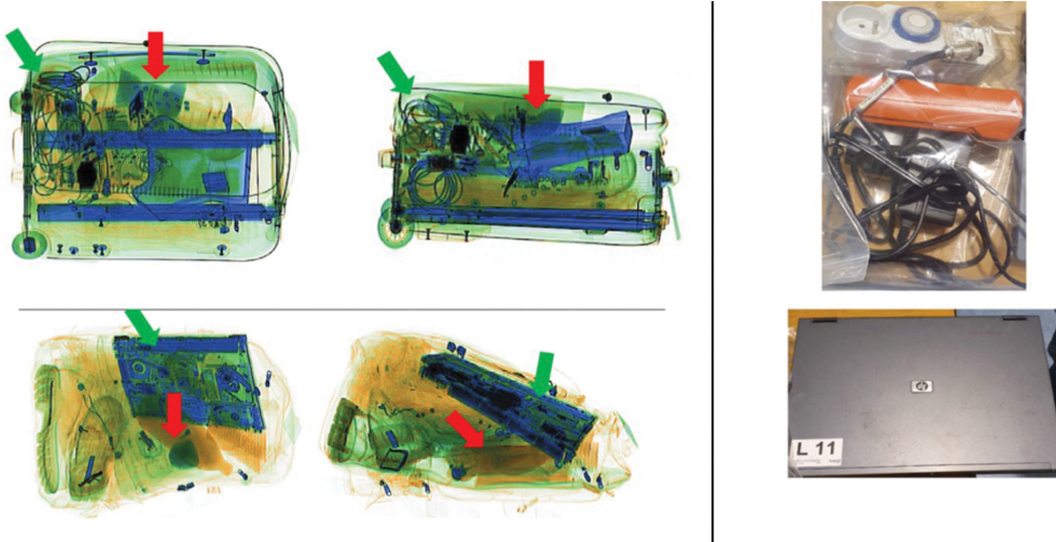


Fig. 1. (Color online) Cluttered X-ray images of airport luggage. Representative images acquired from an in-house dataset, demonstrating complex object overlap and internal structural clutter. The red arrows indicate inorganic powder-like substances, whereas the green arrows denote electronic clutter. These examples highlight the inherent limitations of two-dimensional X-ray projection imaging for reliable material identification in densely packed baggage. Reproduced from Vukadinovic et al., 2023, licensed under CC BY 4.0 [33].

[13,32]. 이 방식은 보안 검색 요원이 검사해야 할 물량을 줄이고 제한된 시간 내 처리 가능한 검사량을 늘려 판독 효율을 높이는 데 기여한다[12,13].

최근에는 딥러닝 기반 합성곱 신경망(CNN, Convolutional Neural Network)의 발전으로 X-ray 영상 판독 자동화의 새로운 가능성을 열었다[21,24]. 딥러닝 알고리즘은 X-ray 영상에서 물질의 형태, 질감, 밀도 정보를 동시에 학습하여 위험 물질을 자동으로 식별한다[27]. 또한 CNN 기법은 X-ray 영상에서 위험 물질의 위치를 확률적으로 추정할 수 있으며, 이 이미지당 1초 이하의 처리 속도로 높은 탐지 정확도를 보이는 것으로 보고되었다[29].

AI 결합 이중 에너지 X-ray의 주요 장점은 자동 표적 인식(ATR) 기법을 통해 마약과 유사 밀도를 갖는 유기물 간 미세한 패턴 차이를 구별할 수 있다는 점이다[12,24,29]. 자동 표적 인식 기법은 수동 판독에서 발생하는 주의력 저하 문제와 판독 편차 문제를 보완하여 일관된 판독 성능을 유지할 수 있다[4,11,12]. 또한 유효 원자번호(Z_{eff})와 영상 질감 특징을 동시에 학습함으로써 기존 색상 매핑 기반 판독으로는 구별하기 어려운 유기물 간 차이를 자동으로 분류할 수 있다[13,29].

그러나 AI 기반 방식에도 몇 가지 한계는 존재한다. 비정형 마약류는 포장 형태와 외형이 일정하지 않아 폭발물 및 무기류에 비해 자동 표적 인식 알고리즘 적용이 어려운 경우가 많다[4]. 또한 실제 보안 검색 환경에서 마약류가 포함된 수하물은 전체의 극히 일부에 불과하여, 인공지능 알고리즘 학습에 필요한 데이터 확보에 어려움이 있다[4].

2. 전산화 단층 촬영(CT, Computed Tomography) 기반 보안검색

2.1. 단일 에너지 CT(Single-energy CT, SE-CT)

단일 에너지 CT(single-energy CT, SE-CT)는 물체를 360° 방향에서 스캔하여 획득한 X-ray 투과 데이터를 재구성함으로써 3차원 영상을 생성하는 기술이다[7,9,18,20]. 보안검색 분야에서는 1990년대 말 위탁수하물 폭발물 탐지 시스템(EDS, Explosive Detection System)에 처음 적용되었다[8,9]. CT는 2차원 X-ray 영상에서 발생하는 구조적 중첩 문제를 해소하고 물체의 형태, 밀도, 위치 정보를 3차원으로 제공한다[8,9,18].

CT 영상에서 사용하는 하운즈필드 단위(HU)는 물질의 X-ray 선형 감쇠계수를 표준화한 값으로, 물질 간 감쇠 특성을 정량적으로 비교하는 핵심 지표이다[9,18,31,47]. HU는 식(3)과 같이 정의된다.

$$HU = 1000 \times \frac{\mu - \mu_{water}}{\mu_{water} - \mu_{air}} \quad (3)$$

식(3)에서 μ 는 물질의 선형 감쇠계수, μ_{water} 는 물의 감쇠계수, μ_{air} 는 공기의 감쇠계수를 의미한다. HU 값은 물질의 상대적 밀도와 감쇠 특성을 정량적으로 표현하며 물질 식별의 핵심 지표로 활용된다.

Grabherr et al.(2008)은 HU 값의 미세한 차이를 분석하여 와인 병 내부에 용해된 코카인을 비침습적으로 식별할 수 있음을 보고하였다. 이는 CT가 액체로 위장된 마약 탐지에도 활용될 수 있음을 보여준다[31].

그러나 SE-CT는 단일 에너지 스펙트럼만을 사용하기 때문에 물질 간 에너지 의존 감쇠 특성을 충분히 반영하지 못한다[8,9]. 이로 인해 밀도가 유사한 유기물 간 구별 정확도가 제한된다[20]. 따라서 마약류와 같은 유기물 탐지를 위해서는 이중 에너지 CT 또는 분광 분석 기법의 병행이 요구된다[18].

2.2. 이중 에너지 CT(Dual-energy CT, DE-CT)

이중 에너지 CT(dual-energy CT, DE-CT)는 두 개의 에너지 스펙트럼(일반적으로 80 keV 및 140 keV)에서 X-ray 데이터를 수집하여, 물질의 전자 밀도와 유효 원자번호(Z_{eff})를 동시에 추정하는 기술이다[7,9,20]. DE-CT는 유기물의 Z_{eff} 범위(약 6~8)를 정밀하게 분석할 수 있어, 마약류와 일반 유기물 간 구별 정확도를 향상시키고 오탐지율을 감소시킨다[7,9,18,20]. 또한 두 에너지 영역 간 감쇠 차이를 이용하여 밀도가 유사한 물질 간 원소 조성 차이까지 구별할 수 있다[7,9]. Fig. 2는 CT가 X-ray 대비 구조적 중첩이 감소하고 물질 구별 능력이 향상됨을 보여준다[34].

초기 DE-CT는 두 에너지 영역의 데이터를 동시에 처리해야 하므로 연산 부담이 크고 분석 시간이 길다는 한계가 있었다[7,9,18,20]. 그러나 최근 고속 연산 기술의 발전으로 처리 속도가 개선되면서 보안검색 현장에서의 활용도가 확대되고 있다[7,9]. 국내에서도 관세청을 중심으로 주요 공항에

DE-CT 기반 자동 탐지 시스템(EDS)을 도입하였으며, 수하물 개봉 없이 내부를 3차원으로 시각화하고 위험 물질을 자동 식별하는 데 활용하고 있다[8,17,19]. 실제 도입 사례로 인천 국제공항은 2021년 Smiths Detection의 고속 폭발물 탐지 시스템 HI-SCAN 10080 XCT를 도입하였으며, 2022년에는 CT 기술을 통합한 HI-SCAN 6040 CTiX 10대를 추가 공급 받았다(Fig. 3)[14].

2.3. AI 결합 CT(AI-based CT)

딥러닝 기반 알고리즘을 CT에 결합하면 물체의 형태와 물질 특성을 동시에 분석하여 탐지 정확도를 향상시킬 수 있다[4,10,15]. CT 영상의 최소 단위인 복셀(Voxel) 데이터를 학습한 알고리즘은 물체의 입체적 형태와 내부 밀도 분포를 정밀하게 분석한다[5,10].

이러한 자동 분석 기술은 보안검색 요원의 숙련도에 따른 편차를 줄이고, 일관된 판독 기준을 제공한다는 장점이 있다[6,9,11]. 특히 볼륨 세그멘테이션(Volume segmentation) 기법은 복잡한 수하물 내부에서 의심 물질 영역을 분리하는 데 효과적으로 활용된다[10,15,21,35]. 해당 기법은 X-ray 감쇠 특성과 형태 정보를 통합 분석하여 적응형 자동 위협 탐지(ATR, Adaptive Automatic Threat Recognition) 기능을 수행한다[10,21,35].

그러나 실제 보안검색 환경에서는 마약류 포함 수하물 비

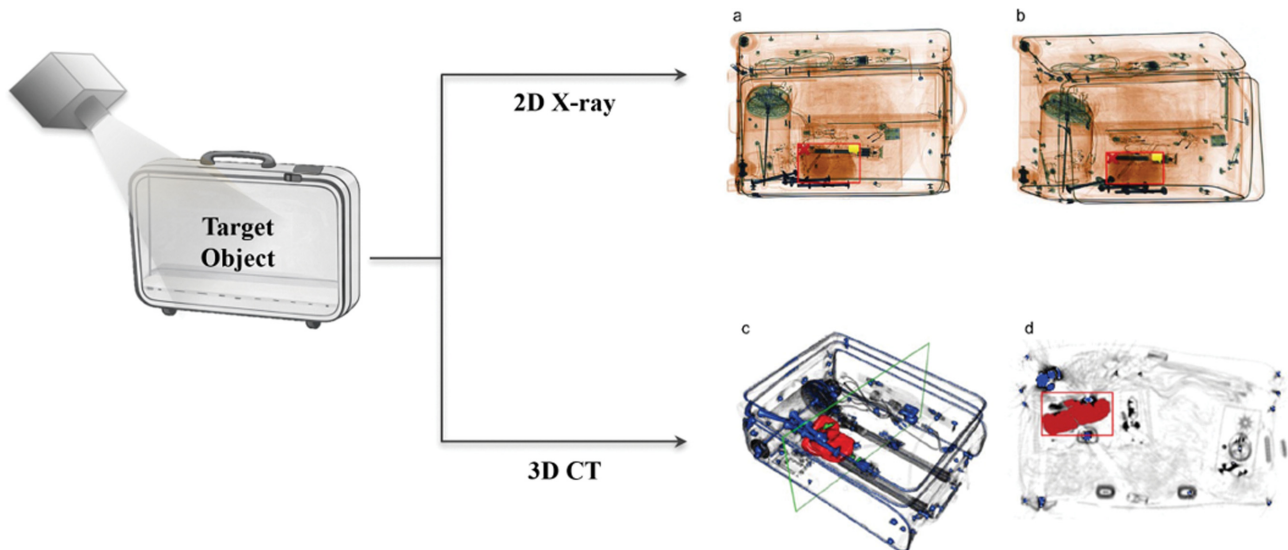


Fig. 2. (Color online) Conceptual comparison of 2D X-ray projection and 3D CT imaging in airport baggage screening. A schematic illustration shows X-ray irradiation of a baggage containing a target object, followed by image acquisition using either 2D X-ray or 3D CT. (a, b) Two-dimensional X-ray projection images acquired from different viewing angles, demonstrating structural overlap and limited depth information. (c) Three-dimensional volume-rendered image and (d) corresponding CT slice image, enabling improved separation of overlapping structures and more accurate localization of the target object. The region of interest is highlighted in red. This comparison illustrates the inherent limitations of 2D projection imaging and the advantages of 3D CT imaging for reliable identification in complex baggage environments. Adapted from Hättenschwiler et al., 2018, licensed under CC BY-NC 4.0 [34].

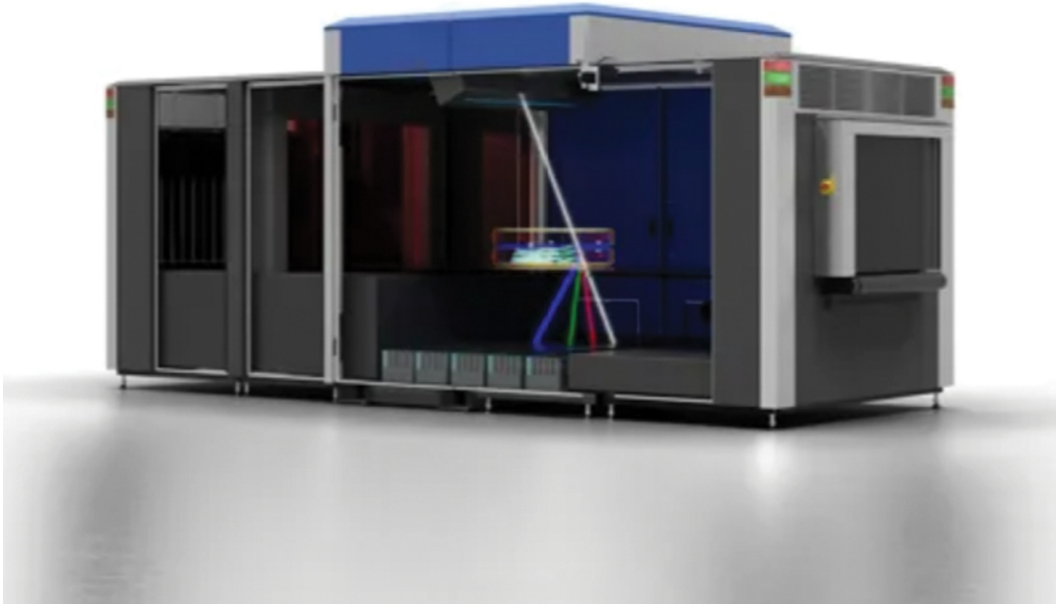


Fig. 3. (Color online) HI-SCAN 6040 CTiX enhanced automated threat resolution and high-throughput baggage screening efficiency. Image courtesy of Smiths Detection Group Ltd.

율이 매우 낮아 학습 데이터 확보가 제한적이다[6]. 또한 현재 AI 모델은 형상이 비교적 일정한 폭발물 및 무기류 탐지에서는 높은 성능을 보이지만, 형태와 포장 방식이 다양한 마약류에 대해서는 상대적으로 탐지 정확도가 낮다[4,11,13].

III. 보안검색 후 정밀 확인 분석법

1. X선 회절(X-ray Diffraction)

X-ray 회절(XRD)은 결정성 물질의 구조를 분석하여 이중 에너지 X-ray가 가지는 유기물 구별 한계를 보완하는 기술이다[43]. X-ray가 결정성 물질의 격자면에 입사하며 특정 각도에서 회절이 발생하며, 이때 형성되는 회절 패턴은 물질 고유의 특성을 반영한다[25,30]. 이러한 현상은 브래그 법칙(Bragg's law)에 기반하며, 식

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (4)$$

식(4)에서 n 은 회절 차수, λ 는 입사 X-ray의 파장, d 는 격자 간격, θ 는 입사각이다. 이 관계식을 통해 물질의 결정 구조를 정량적으로 분석할 수 있다[25]. 측정된 회절 패턴은 물질의 결정 구조와 화학 조성을 식별하는 데 활용되며, 마약류의 경우 순도 및 혼합 성분 확인이 가능하다[25,30,38].

XRD는 CT 기반 1차 선별 이후 수행되는 2차 확정 분석 기술로 적합하다[36]. 실제로 XRD 기반 분석 시스템은 공항 보안검색 현장에서 활용되고 있으며, CT와 결합된 2단계 탐지 체계의 실용성을 입증하였다[37]. 그러나 XRD는 분석 속도가 상대적으로 느리고 장비 부피가 커 현장 적용 및 휴대

성이 제한되는 단점이 있다[38,43].

따라서 대용량 수하물의 효율적 검색을 위해 에너지 분산형 X선 회절(EDXRD, Energy-Dispersive X-ray Diffraction)이 대안으로 제시되고 있다[25,36]. EDXRD는 일반 XRD와 달리 여러 에너지 대역이 혼합된 X-ray를 사용하여 검출기를 고정된 채 에너지 스펙트럼을 분석하는 방식이다[25,35]. 이는 시료나 X선 발생 장치를 회전시킬 필요가 없어 구조가 비교적 단순하며 은닉된 물질을 비파괴적으로 분석할 수 있다는 장점이 있다[25,36]. XRD는 CT에 비해 해상도가 제한적이지만 CT 단독으로는 얻을 수 없는 결정 구조 정보를 추가로 제공함으로써 위험 물질 탐지 능력을 보완할 수 있다. 이에 따라 CT 기반 1차 선별과 XRD 기반 2차 정밀 분석을 결합한 2단계 보안검색 체계가 경제적으로 유망한 대안으로 주목받고 있다[38].

2. X선 형광 분석(X-ray Fluorescence, XRF)

X-ray 형광 분석(XRF)은 시료에 고에너지 X-ray를 조사할 때 방출되는 형광 X-ray를 분석하여 원소 조성을 파악하는 기법이다[30,38]. 방출되는 형광 X-ray의 에너지는 원자번호에 따라 결정되며, 이를 통해 원자 번호 9(F)부터 92(U)까지의 원소를 정성적으로 식별할 수 있다. 또한 형광 강도를 측정하면 원소 함량의 정량 분석도 가능하다[37]. XRF는 비파괴 및 비접촉 분석이 가능하며 복잡한 시료 전처리가 불필요하다는 장점이 있다[39].

한편 마약류는 주로 원자번호가 낮은 탄소(C), 수소(H), 질소(N), 산소(O)로 구성되어 있어 XRF의 주요 검출 범위(원

자번호 9번 이상)를 벗어나는 제한이 있다[39]. 최근 장비의 소형화로 휴대용 XRF 장비를 이용한 공항 및 항만 내 실시간 분석이 가능해졌으나, 마약류의 직접적인 식별은 여전히 어렵다[30,38]. 따라서 보안 검색 분야에서 XRF는 마약 자체의 식별보다는 불순물 분석 및 법과학적 출처 추적을 위한 보조 기법으로 활용된다[30,39]. 최근에는 XRF가 Raman 또는 X-ray 영상 장비와 결합한 융합 분석 시스템 형태로 발전하고 있다[39].

3. 라만 분광법(Raman Spectroscopy)

라만 분광법(Raman Spectroscopy)은 단색 레이저 조사 시 발생하는 비탄성 산란을 분석하여 분자의 진동 정보를 측정하는 기법이다[33,41,46]. 라만 스펙트럼은 분자 고유의 지문 정보를 제공하며, 푸리에 변환 적외선 분광법(FT-IR)과 상호 보완적으로 활용된다[41]. 또한 유리나 플라스틱 용기를 투과하여 내부 물질을 분석할 수 있어 비파괴 분석에 적합하다[35,45,46].

최근에는 라만 분광법을 응용하여 다양한 신호 증폭 및 분석 방식이 활용되고 있다[44-46]. 표면 증강 라만 분광법(SERS)은 금속 나노입자 표면에 분석물을 흡착시켜 라만 신호를 크게 증폭함으로써 극미량의 마약도 탐지할 수 있다[35,44-46]. 공간 오프셋 라만 분광법(SORS)은 레이저 조사 지점과 라만 신호 수집 지점을 공간적으로 분리하여 포장재를 투과하여 내부를 분석할 수 있어, 밀봉된 위험물 또는 은닉된 마약류 식별에 활용되고 있다[48]. 또한 공명 라만 분광법(Resonance Raman Spectroscopy)은 레이저의 파장을 시료의 전이 에너지와 일치시켜 특정 분자의 진동 신호를 선택적으로 강화해 위험 물질 식별 효율을 향상시킬 수 있다[35].

라만 분광법의 주요 한계는 형광 간섭(Fluorescence Interference)이다[33,45]. 라만 신호는 입사광의 약 10^{-7} 수준으로 매우 약하기 때문에, 시료 내 미량의 형광 불순물 존재만으로도 라만 신호는 형광 신호에 완전히 가려질 수 있다[33]. 또한 휴대용 기기는 실험실 장비 대비 감도가 낮아 여러 성분이 혼합된 시료에서는 스펙트럼 피크가 중첩되어 정확도가 저하될 수 있다[35].

4. 푸리에 변환 적외선 분광법(FT-IR, Fourier Transform Infrared Spectroscopy)

푸리에 변환 적외선 분광법(FT-IR)은 적외선 흡수 스펙트럼을 이용하여 분자 작용기 정보를 분석하는 기법이다[40,41]. 특히 감쇠 전반사 방식(ATR-FT-IR, Attenuated Total Reflection FT-IR)을 활용하면 전처리 없이 다양한 형태의 시료를 최소한의 전처리로 빠르게 분석할 수 있어 현장 적용성이 높다[41]. FT-IR는 마약류 분석에서 주로 코카인, 헤로인, 펜타닐

등의 표준 스펙트럼과 비교하여 물질을 식별하며, 신속한 선별 분석에 활용된다[40,41].

ATR-FT-IR은 현장용 휴대형 기기의 발전으로 세관 및 국경 통제 현장에서 주요 선별 도구로 활용되고 있다[43,44]. Lanzarotta et al.(2023)은 국제우편 시설의 위성 실험실에서 휴대형 라만 분광기, 휴대형 FT-IR, 휴대형 질량분석기를 조합하여 의약 성분을 신속 탐지하였고, 분석 장비의 조합 사용 시 판별 정확도가 향상됨을 확인하였다[45]. 또한 FT-IR과 X선 분말 회절(XRPD, X-ray Powder Diffraction)을 결합하면 화학 시약이나 용매 없이 시료를 분석할 수 있으며, 특히 용해 또는 여과 과정에서 소실되기 쉬운 부형제 성분까지 식별할 수 있다[43].

그러나 FT-IR은 수분 흡수 간섭, 혼합물 내 미량 성분 탐지의 어려움, 짙은 색상 시료에서의 신호 대 잡음비(SNR) 저하라는 세 가지 한계를 가진다[42,45]. 특히 코카인이 짙은 유색의 분말과 혼합된 밀수 사례에서 FT-IR 단독 분석 시 음성 판정이 나오는 경우가 보고되어 있다. 따라서 확정 판독을 위해서는 가스크로마토그래피-질량분석기(GC-MS) 등 정밀 분석 기법과 병행하는 것이 권장된다[41,42].

IV. 고찰 및 결론

본 논문에서는 보안검색 분야에서 마약 탐지에 활용되는 X-ray, CT, 2차 정밀분석 기법의 발전 동향을 검토하고 각 기술의 원리와 한계를 비교 분석하였다. 기존 X-ray 기반 보안검색 시스템은 유사 밀도의 유기물 구별과 구조적 중첩 문제로 인해 마약 탐지 정확도가 제한된다. 이중 에너지 X-ray는 유효 원자번호(Z_{eff})와 밀도를 동시에 추정함으로써 이를 일부 보완하였으나, 2차원 영상의 구조적 한계는 여전히 존재한다. 반면 CT는 3차원 영상 재구성과 HU 기반 정량 분석을 통해 물질의 구조와 조성을 보다 정밀하게 분석할 수 있어 보안검색 현장에서 활용성이 높다. 그러나 CT 단독으로는 마약의 화학적 조성까지 확정하기 어렵기 때문에, AI 기반 분석 기술의 도입이 요구된다. 현재 AI 기반 탐지 기술은 형상이 일정한 폭발물 중심으로 발전되어 마약류와 같이 형태와 조성이 다양한 물질에 대해서는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 고해상도 CT 영상 기술과 마약 탐지 특화 AI 알고리즘의 통합적 접근이 필요하다. 현재 공항에 주로 보급된 항공보안 검색용 CT는 폭발물이나 일정 크기 이상의 물체를 신속하게 식별하는 것이 목적이므로 의료용 CT 대비 영상 해상도와 소재 변별력이 상대적으로 낮다. 따라서 의료 등급의 CT 수준의 고해상도 영상 기술과 정밀한 HU 단위 기반 분석 특성을 보안검색 기술에 접목한다면 마약류 탐지 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 국

내에서는 관세청을 중심으로 주요 공항에 이중 에너지 CT 기반 탐지 시스템을 도입하고 있으나, 마약 탐지 특화 알고리즘과의 병행과 고해상도 의료 등급 CT의 적용은 여전히 해결해야 할 과제로 남아있다. 본 연구에서는 이러한 기술적 흐름을 기반으로, 마약류의 물리·화학적 특성을 정밀하게 반영할 수 있는 마약 탐지 시물런트 개발의 필요성을 제시하였다. 시물런트는 실제 마약을 대체하여 CT 영상 특성을 재현함으로써 탐지 장비 성능 평가, AI 학습 데이터 구축, 보안 검색 시스템 검증 수단으로 활용할 수 있다. 따라서 고해상도 CT, 마약 탐지 특화 AI 기술, 그리고 시물런트 개발을 결합한 연구는 정밀한 보안검색 체계를 구축하여 차세대 보안검색 핵심 기술로 자리잡을 것으로 기대한다.

References

- [1] UNODC, World Drug Report 2023, United Nations (2023).
- [2] UNODC Regional Office for Southeast Asia and the Pacific (United Nations, 2025). https://www.unodc.org/roseap/uploads/documents/Publications/2025/XAPXP7_Regional_Programme_for_Southeast_Asia_and_the_Pacific_20222026_Final_to_publish.pdf
- [3] D. Mery, S. Daniel, and M. Prasad, IEEE Access **8**, 145620 (2020).
- [4] S. Akcay and T. Breckon, Pattern Recognit. **122**, 108245 (2022).
- [5] R. E. Alvarez and A. Macovski, Phys. Med. Biol. **21**, 733 (1976).
- [6] M. Broadbent, Airports Int. (2023) <https://www.airportsinternational.com/author/mark-broadbent>
- [7] C. J. Schaeffer, S. M. Leon, C. A. Olguin, and M. M. Arreola, Med. Phys. **48**, 3525 (2021).
- [8] S. Singh and M. Singh, Signal Process. **83**, 31 (2003).
- [9] G. Flitton, T. P. Breckon, and N. Megherbi, Pattern Recognit. **46**, 2420 (2013).
- [10] Q. Wang, N. Bhowmik, and T. P. Breckon, Proc. IEEE Int. Conf. Mach. Learn. Appl. (ICMLA), 13 (2020).
- [11] J. M. Wolfe, D. N. Brunelli, J. Rubinstein, and T. S. Horowitz, J. Vis. **13**, 33 (2013).
- [12] S. R. Mitroff, J. M. Ericson, and B. Sharpe, Hum. Factors **60**, 201 (2018).
- [13] S. Akcay, M. E. Kundegorski, C. G. Willcocks, and T. P. Breckon, IEEE Trans. Inf. Forensics Secur. **13**, 2203 (2018).
- [14] H. Y. Jung, AI Times Kr. (2022). <https://www.aitimes.kr/news/articleView.html?idxno=24787>
- [15] Y. Wei, Z. Zhu, H. Yu, and W. Zhang, J. Real-Time Image Process. **18**, 923 (2021).
- [16] P. Lalor and A. Danagouliau, Appl. Radiat. Isot. **206**, 111201 (2024).
- [17] Korea Customs Service, e-National Indicators (2025). <https://www.customs.go.kr/streamdocs/view/sd;streamdocsId=72059363082014332>
- [18] A. Mouton and T. P. Breckon, J. X-Ray Sci. Technol. **23**, 531 (2015).
- [19] Korea Customs Service, Press Release, Mar. 31 (2025). <https://www.korea.kr/docViewer/skin/doc.html?fn=9c1f7221ac5c158d6702bcade6ec7aec&rs=/docViewer/result/2025.03/31/9c1f7221ac5c158d6702bcade6ec7aec>
- [20] Q. Wang, K. N. Ismail, and T. P. Breckon, J. X-Ray Sci. Technol. **28**, 35 (2020).
- [21] N. Bhowmik, Y. F. A. Gaus, and T. P. Breckon, Proc. IEEE Int. Conf. Image Process. (ICIP), 1224 (2021).
- [22] O. Yalçın and I. A. Reyhancan, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **1040**, 167265 (2022).
- [23] B. J. Heismann, J. Leppert, and K. Stierstorfer, J. Appl. Phys. **94**, 2073 (2003).
- [24] E. Benedykciuk, M. Denkowski, and K. Dmitruk, Signal Image Video Process. **15**, 1285 (2021).
- [25] G. Harding, Appl. Radiat. Isot. **67**, 287 (2009).
- [26] H. Strecker, G. Harding, H. Bomsdorf, J. Kanzenbach, R. Linde, and G. Martens, Proc. SPIE 2092, 399 (1993).
- [27] O. E. Wetter, J. Forensic Radiol. Imaging **1**, 152 (2013).
- [28] R. Kayalvizhi, S. Malarvizhi, A. Topkar, and P. Vijayakumar, Radiat. Phys. Chem. **193**, 109512 (2022).
- [29] N. Bhowmik and T. P. Breckon, Proc. IEEE Int. Conf. Mach. Learn. Appl. (ICMLA), 1463 (2022).
- [30] T. D. Schachel, A. Stork, R. Schulte-Ladbeck, T. Vielhaber, and U. Karst, Forensic Sci. Int. **308**, 110180 (2020).
- [31] S. Grabherr, S. Ross, P. Regenscheit, B. Werner, L. Oesterhelweg, S. Bolliger, and M. J. Thali, Am. J. Roentgenol. **190**, 1390 (2008).
- [32] K. Wells and D. A. Bradley, Appl. Radiat. Isot. **70**, 1729 (2012).
- [33] D. Vukadinovic, M. Ruiz Osos, and D. Anderson, J. Transp. Secur. **16**, 3 (2023).
- [34] N. Hättenschwiler, M. Mendes, and A. Schwaninger, Hum. Factors **61**, 305 (2019).
- [35] R. Holze, J. Solid State Electrochem. **11**, 558 (2007).
- [36] Q. Song, Y. Chen, X. Wang, B. Yang, J. Xu, K. Xiong, and B. Mu, Opt. Express **27**, 26163 (2019).
- [37] B. Jurásek, V. Bartůněk, Š. Huber, M. Kuchař, M. Kovařík, P. Kříž, M. Hájek, M. Pospíšil, and M. Hampl, Front. Chem. **8**, 499 (2020).
- [38] A. Korolkovas, Sci. Rep. **12**, 19097 (2022).
- [39] R. Jenkins, Introduction to X-ray Spectrometry, Wiley, New York (1999), pp. 43~196.
- [40] T. M. Salerno, P. Donato, G. Frison, L. Zamengo, and L. Mondello, Front. Chem. **8**, 624 (2020).
- [41] E. Deconinck, C. Duchateau, M. Balcaen, L. Gremeaux, and P. Courselle, Rev. Anal. Chem. **41**, 228 (2022).
- [42] M. C. A. Marcelo, K. C. Mariotti, M. F. Ferrão, and R. S. Ortiz, Forensic Sci. Int. **246**, 65 (2015).
- [43] A. Mocarska, K. Piorunska, J. K. Maurin, and A. Blazewicz, Front. Chem. **13**, 1536209 (2025).

- [44] S. Assi, I. Abbas, K. Kieliszczk, O. Wade, and B. Arafat, *Spectroscopy* **38**, 30 (2023).
- [45] A. Lanzarotta, S. Kern, J. Batson, B. Boyd, M. M. Kimani, W. Kuo, D. LaGarde, M. Loh, L. L. Adeoshun, L. Lorenz, R. Melendez, F. Morales-Garcia, M. Thatcher, A. E. Wetherby Jr., and M. R. Witkowski, *J. Pharm. Biomed. Anal.* **224**, 115153 (2023).
- [46] M. J. West and M. J. Went, *Drug Test. Anal.* **3**, 532 (2011).
- [47] Z. H. Levine, A. P. Peskin, A. D. Holmgren, and E. J. Garboczi, *PLoS ONE* **13**, e0208820 (2018).
- [48] P. Matousek and N. Stone, *Chem. Soc. Rev.* **45**, 1794 (2016).