

Imaging Principles and Technology Trends in X-ray Security Inspection Systems

Hyun-Dong Kim¹, Kyung-Hwan Jung¹, Ki-Yoon Lee¹, Hyun-Soo Ha¹, and Cheol-Ha Baek^{1,2*}

¹Department of Medical Health Science, Kangwon National University, Samcheok 25949, Republic of Korea

²Department of Radiological Science, Kangwon National University, Samcheok 25949, Republic of Korea

Seung-Jae Lee

Department of Radiological Science, Dongseo University, Busan 47011, Republic of Korea

(Received 18 March 2026, Received in final form 23 April 2026, Accepted 24 April 2026)

X-ray security screening technology has continuously evolved in response to the strengthening of global security frameworks, extending its applications beyond airport baggage inspection to large-scale cargo screening, container inspection, and the protection of critical infrastructure. With the rapid growth of international logistics, concealment strategies for illicit materials such as narcotics, explosives, and weapons have become increasingly sophisticated, leading to heightened demands for improved detection performance. However, two-dimensional transmission-based X-ray imaging inherently suffers from object overlap, resulting in structural ambiguity and limited discrimination between materials with similar density and atomic number. To address these limitations, advanced techniques including dual-energy material decomposition and three-dimensional (3D) computed tomography (CT) imaging have been introduced, along with the integration of photon counting detectors and artificial intelligence driven algorithms for automated threat detection. This paper systematically reviews the structural evolution and technological trends of X-ray security screening systems based on the fundamental physical principles of X-ray image formation, providing an integrated analysis of hardware configurations and image analysis methodologies with a focus on dual-energy material decomposition and 3D volumetric imaging. The recent advancements and future directions of AI-based threat detection approaches are also discussed.

Keywords : electromagnetic radiation, X-ray imaging, X-ray detector, security screening systems

엑스선 보안검색 시스템의 영상화 원리 및 기술 동향

김현동¹ · 정경환¹ · 이기윤¹ · 하현수¹ · 백철하^{1,2*}

¹강원대학교 일반대학원 보건의료과학과, 강원특별자치도 삼척시 황조길 346, 25949

²강원대학교 방사선학과, 강원특별자치도 삼척시 황조길 346, 25949

이승재

동서대학교 방사선학과, 부산광역시 주례로 47, 47011

(2026년 3월 18일 받음, 2026년 4월 23일 최종수정본 받음, 2026년 4월 24일 게재확정)

엑스선 보안검색 기술은 전 세계적인 보안 체계 강화에 대응하여 지속적으로 발전해 왔으며, 공항 수하물 검색을 넘어 대형 화물, 컨테이너 검사 및 국가 핵심 시설 보안 등으로 적용 범위가 확대되고 있다. 국제 물류의 급속한 증가와 함께 마약, 폭발물, 무기류 등의 불법 물질에 대한 은닉 수법이 고도화됨에 따라, 기존 보안검색 시스템의 탐지 성능 향상에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 2차원 투과 기반 엑스선 영상은 물체 중첩으로 인한 구조적 불확실성과 유사 밀도 및 원자번호를 갖는 물질 간 구분의 한계를 본질적으로 내포하고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 이중에너지 기반 물질 분해 기술과 전산화 단층촬영(Computed Tomography, CT) 기반 3차원 영상화 기법이 도입되었으며, 최근에는 광자계수형 검출기와 인공지능 기반 자동 탐지 알고리즘이 결합된 지능형 보안검색 기술이 활발히 연구되고 있다. 본 논문에서는 엑스선 영상 형성의 기본 물리 원리를 기반으로 보안검색 시스템의 구조적 발전과 주요 기술 동향을 체계적으로 정리한다. 특히 이중에너지 물질 분해 및 3차원 체

적 영상화 기술을 중심으로 하드웨어 구성과 영상 분석 기법을 통합적으로 분석하며, 최근 인공지능 기반 위험물 탐지 기술의 발전 동향과 향후 연구 방향을 종합적으로 논의한다.

주제어 : 전자기 방사선, 엑스선 영상, 엑스선 검출기, 보안 검색 장비

I. 서 론

1. 엑스선 보안검색기의 역사적 배경 및 활용 분야의 확대

엑스선 보안검색 기술은 2001년 미국에서 발생한 9·11 테러 이후 전 세계적으로 빠르게 발전해 왔으며, 이에 따라 공항 및 물류 보안 체계 또한 지속적으로 강화되고 있다. 미국은 보안 강화를 위해 국토안보부(United States Department of Homeland Security, DHS) 산하에 교통안전청(Transportation Security Administration, TSA)을 설립하고 공항 보안검색 절차와 장비 성능 기준을 체계적으로 정립하였다. 또한 유럽연합(European Union, EU)은 유럽민간항공위원회(European Civil Aviation Conference, ECAC)를 중심으로 항공보안 장비의 성능 인증 체계를 운영하며 보안검색 기술의 표준화를 추진하고 있다. 이러한 국제적 보안 정책의 변화는 항공 및 항만 시설뿐 아니라 국가 핵심 시설과 민간 보안 분야까지 보안검색 기술의 적용 범위를 확대시켰으며, 그 결과 엑스선 기반 보안검색 기술은 다양한 보안 환경에서 핵심적인 탐지 수단으로 자리 잡고 있다.

최근 항공 및 해상 운송 기술의 발전과 글로벌 물류 네트워크의 확대로 국가 간 접근성이 크게 향상되었다. 그러나 국제 여객 및 화물 운송량이 급격히 증가함에 따라 마약, 폭발물 및 불법 반입 물품의 은닉 가능성이 증가하고 테러 위협 또한 지속적으로 제기되고 있다. 이러한 배경에서 엑스선 보안검색 시스템은 공항 및 항만에서의 소형 수하물을 포함한 대형 화물, 우편물, 컨테이너 화물 검사 등으로 적용 범위가 확대되었으며, 국가 핵심 시설의 출입 통제 보안 등 다양한 분야에서 국가 안전을 위한 필수 시스템으로 활용되고 있다. 이에 따라 보안검색 장비의 탐지 정확도와 물질 식별 능력을 향상시키기 위한 기술 고도화의 필요성이 지속적으로 제기되고 있다[1-7].

2. 엑스선 보안검색기의 기술 고도화의 필요성

엑스선 보안검색 기술은 대상 물체를 개봉하지 않고 내부 구조를 실시간으로 확인할 수 있는 대표적인 비파괴 검사 기술로서, 수하물, 화물, 컨테이너 검색에 폭넓게 활용되고 있다. 그러나 기존 2차원 투과 영상 기반 검색 방식은 엑스선의 단일 투과 방향으로 서로 다른 물체가 중첩되어 표현되기 때문에 복잡한 내부 구조에서 위험물의 형상과 위치를 명확히 구분하는 데 한계가 있다. 또한 단일 투과정보에 기반한 영상은 밀도와 유효원자번호가 유사한 물질 간 분별력이 제

한적이므로, 마약, 폭발물, 무기류 등 위해물품과 일반 생활용품 사이에서 오탐지 및 미탐지 가능성이 존재한다. 더불어 실제 검색 환경에서는 산란선, 검출기 잡음, 빔 하드닝, 금속 아티팩트 등으로 인해 영상 품질이 저하되어 판독 정확성이 영향을 받을 수 있다.

이러한 한계를 보완하기 위해 최근에는 저에너지 및 고에너지 정보를 이용하여 물질 특성을 보다 정밀하게 구분하는 이중 에너지 엑스선 기술과, 다각도 투영 정보를 기반으로 3차원 내부 구조를 재구성하는 전산화단층촬영(Computed Tomography, CT) 기반 보안검색 시스템이 도입되고 있다. 이러한 방식은 기존 2차원 투과 영상의 중첩 한계를 완화하고 물질 분별 정확도를 향상시켰으나, 연산 처리 속도, 시스템 복잡도 및 비용 등의 측면에서 여전히 제약이 존재하므로 추가적인 기술 고도화가 필요하다. 특히 지능화되는 테러 위협과 급증하는 물동량에 효과적으로 대응하기 위해서는 높은 탐지 정확도와 실시간 처리 성능을 동시에 만족하는 자동 위험물 탐지 기술이 필요하다. 최근 인공지능 기술의 발전은 복잡한 검색 영상에서 위험물의 특징을 자동으로 학습하고 판독자 의존성을 줄일 수 있는 가능성을 제시하고 있으며, 이에 따라 보안검색 시스템의 탐지 성능과 운용 효율을 향상시키기 위한 인공지능 기반 위험물 탐지 기술의 연구개발 필요성이 더욱 커지고 있다[8,9].

II. 엑스선 영상화 원리 및 시스템 구성

1. 엑스선의 물리적 특성

엑스선은 전자기 스펙트럼 상에서 자외선과 감마선 대역 사이에 분포하는 고에너지 전자기파로, 진공 중 파장은 대략 $10^{-8} \text{ m} \sim 10^{-11} \text{ m}$ (10 nm-10 pm) 범위에 해당하며, 일반적으로 수 keV에서 수백 keV 범위의 광자 에너지를 가진다. 보안검색 및 의료 영상에 사용되는 엑스선은 가속된 전자가 금속 표적과 상호작용할 때 발생하며, 이 과정에서 전자의 운동에너지가 복사 에너지로 전환된다. 엑스선 발생 장치는 Fig. 1과 같이 고진공 상태의 튜브 내부에 음극과 양극을 배치한 구조를 가진다. 필라멘트 가열에 의해 방출된 열전자는 음극과 양극 사이에 인가된 고전압에 의해 가속되어 표적에 충돌하고, 이때 고속 전자의 급격한 감속에 의해 연속 스펙트럼의 제동복사가 발생하며, 동시에 표적 원자의 내각 전자가 이온화된 뒤 상위 궤도 전자가 천이하면서 불연속적인 에너지를 갖는 특성 엑스선이 발생한다. 입사 전자의 전체 에너지를

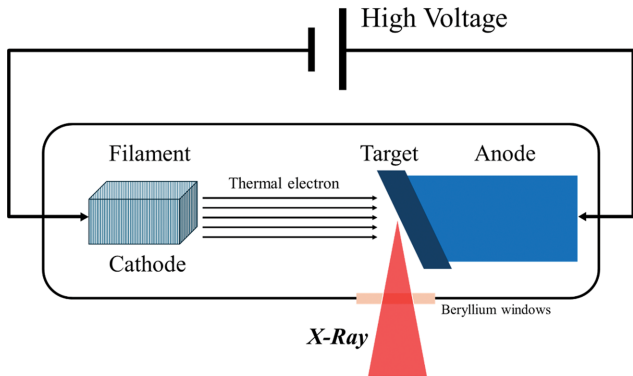


Fig. 1. (Color online) Schematic of the X-ray generation process, showing electrons emitted from the cathode, accelerated toward the target by a high voltage, and producing bremsstrahlung and characteristic X-rays upon collision with the target.

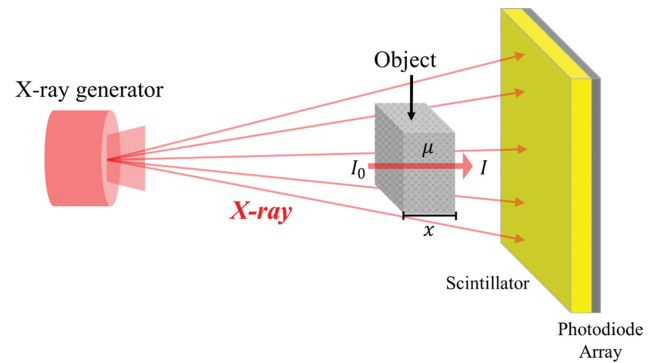


Fig. 2. (Color online) Conceptual illustration of X-ray image formation governed by the Beer-Lambert law, in which image contrast is produced by spatial variations in transmitted intensity resulting from differences in material attenuation properties and X-ray path length.

중 약 1% 미만이 엑스선으로 변환되고, 99% 이상의 에너지가 열 에너지로 소산되므로 효율 향상을 위한 열관리 설계가 필수적이다.

엑스선 영상의 품질과 물질에 대한 투과능은 관전압(kVp)과 관전류(mA), 조사시간, 표적 재질 및 여과 조건에 의해 결정된다. 관전압은 생성 가능한 엑스선의 최대 에너지 ($E_{max} = eV$)에 따라 물질의 감쇠계수와 엑스선의 선질을 결정하는 중요한 인자이며, 관전류는 단위 시간당 방출되는 전자 수와 광자 선속을 결정하며, 조사시간과의 곱인 mAs는 총 방출 광자량에 영향을 미친다. 또한 엑스선 빔은 다색 스펙트럼이므로, 고유여과 및 부가여과에 의한 스펙트럼의 정형이 필요하다. 이러한 스펙트럼 조절은 영상 대비, 피사체 투과 특성, 검출기 입력 신호, 방사선 선량 특성에 모두 영향을 미친다[10,11].

2. 엑스선 영상 획득 원리

가속된 전자에 의해 생성된 엑스선 광자가 검색 대상 물체를 통과할 때, 광자는 물질과의 상호작용을 통해 흡수되거나 산란되며, 이 과정이 엑스선 영상 형성의 물리적 기반이며, 광전효과, 콤프턴 산란, 그리고 1.022 MeV 이상의 영역에서의 전자쌍 생성으로 구분된다. 광전효과의 발생확률은 일반적으로 원자번호에 강하게 의존하고 광자 에너지 증가에 따라 급격히 감소하므로, 고원자번호 물질에서 저에너지 광자에 대

해 우세하게 나타난다. 반면 콤프턴 산란은 주로 전자밀도에 비례하므로 유기물 및 저원자번호 물질에서도 중요한 감쇠 성분으로 작용한다.

Fig. 2에 나타낸 엑스선 영상 획득 과정은 입사 강도 I_0 와 투과 강도 I 사이의 관계로 표현되는 지수 감쇠 법칙(Beer-Lambert law)에 기반하며 식(1)에 기술하였다.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \tag{1}$$

여기서 μ 는 선감쇠계수로서 에너지와 물질 특성에 의존하며, x 는 유효 경로 길이이다. 선감쇠계수는 밀도 ρ 와 질량감쇠계수 μ/ρ 의 곱으로 계산된다. 고밀도·고원자번호 물질은 높은 감쇠를 나타내고, 저밀도·저원자번호 물질은 낮은 감쇠를 나타내어 이를 기반으로 영상을 재구성하여 엑스선 영상을 획득한다.

검출기 시스템은 투과된 엑스선을 전기적 신호로 변환하여 최종 영상 형성에 필요한 데이터를 제공한다. 현재 보안검색 및 디지털 엑스선 영상 시스템에서는 주로 에너지적분형 검출기(energy integrating detector, EID)와 광자계수형 검출기(photon counting detector, PCD)가 사용된다. EID는 입사 광자의 에너지를 적분하여 누적 신호를 형성하는 반면, PCD는 개별 광자를 계수하고 에너지 임계값 기반으로 분류할 수 있어 스펙트럴 영상화에 유리하다. 이와 같은 검출기 유형의 작동 원리와 특성 차이를 비교하기 위하여 관련 내용을 Table I에 정리하였다. 대표적인 EID 기반 평판검출기(flat-

Table I. Comparison of detector types used in X-ray security screening systems.

Category	Type	Strengths	Limitations	Typical use
Detector	EID	Established, reliable, operationally efficient	Limited spectral discrimination	Conventional X-ray screening
	PCD	Spectral imaging, improved CNR, material discrimination	Count-rate limit, charge sharing, pulse pile-up	Spectral and CT-based screening

panel detector, FPD)는 일반적으로 신틸레이터와 비정질 실리콘(a-Si) 광다이오드 회로로 구성되는 간접변환 방식으로, 입사 엑스선을 먼저 가시광으로 변환한 뒤 이를 전기 신호로 적분하여 영상화한다. 반면 광자계수 방식은 카드뮴 텔루라이드(Cadmium Telluride, CdTe) 또는 카드뮴 아연 텔루라이드(Cadmium Zinc Telluride, CZT)와 같은 반도체 검출기를 사용하여 입사 광자를 직접 전기 신호로 변환하고, 각 광자에 대해 개별 펄스를 생성하여 계수하므로 에너지 임계값 기반의 스펙트럼 분해가 가능하다. 이러한 특성은 전자잡음 저감, 높은 공간분해능, 향상된 대비대잡음비 및 다중에너지 영상 획득 측면에서 유리하므로, 이를 효과적으로 활용하기 위한 검출기 구조, 신호처리 기법, 영상 재구성 및 물질 분별 기술에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다[12-15].

III. 보안검색 기술의 분류 및 주요 장비 특성

1. 엑스선 영상 획득 방법에 따른 분류

엑스선 보안검색기의 영상 획득 방식은 대상 물질과 상호 작용한 엑스선 신호를 검출하는 원리에 따라 크게 투과식과 산란식으로 구분할 수 있다. 투과식 엑스선 영상화는 엑스선이 대상 물체를 통과하는 과정에서 발생하는 감약 신호를 기반으로 영상을 형성하는 방식으로, 수하물, 소포 및 대형 화

물과 같이 물체 전체 두께에 대한 정보가 필요한 검색에 주로 활용된다. 반면 산란식 엑스선 영상화는 물체에서 산란되어 되돌아오는 후방산란 신호를 이용하는 방식으로, 표면 또는 표면 근처에 위치한 물질에 대한 민감도가 높다. 그러나 투과 깊이가 제한되므로 깊은 위치에 은닉된 물체에 대해서는 탐지 성능이 저하될 수 있다. 이와 같은 영상 획득 방식의 주요 특성과 한계를 비교하기 위하여, 관련 내용을 Table II에 정리하였다[16-19].

2. 검출기 구성 및 고도화 기술

투과식 엑스선 검색장비의 판독 효율은 검출기 배열, 시점의 수, 에너지 정보의 활용에 따라 결정된다. 먼저, 단방향 엑스선 검색장비는 구조가 간단하고 검색 속도가 빠른 장점이 있다. 그러나 물체가 중첩되고, 부피 측정이 어려운 한계가 있다. 이를 완화한 방법인 다중 시점 엑스선 검색장비는 두 개의 엑스선 튜브를 사용하므로 측면에서의 시점이 추가되어 중첩된 물체를 볼 수 있으며 부피를 예측할 수 있는 장점이 있다. Fig. 3(a)는 최근 보안 검색기에서 널리 사용되는 L자형(L-shaped) 배열로 하단과 측면에 검출기를 직각 형태로 배치한 구조이며, 기하학적 중첩 문제를 완화할 수 있고 물체의 하부 정보와 측면 정보를 동시에 획득하여 물체의 투영 정보를 보완하여 위치 정확도를 개선할 수 있다. Fig.

Table II. Comparison of X-ray acquisition modes in security screening systems.

Category	Type	Strengths	Limitations	Typical use
Acquisition mode	Transmission imaging	Full-thickness penetration, suitable for bulk inspection	Object overlap in projection images	Baggage, Luggage, cargo screening
	Backscatter imaging	Sensitive to near-surface and low-Z materials, material discrimination	Limited penetration, low sensitivity for deep objects	Surface and near surface inspection

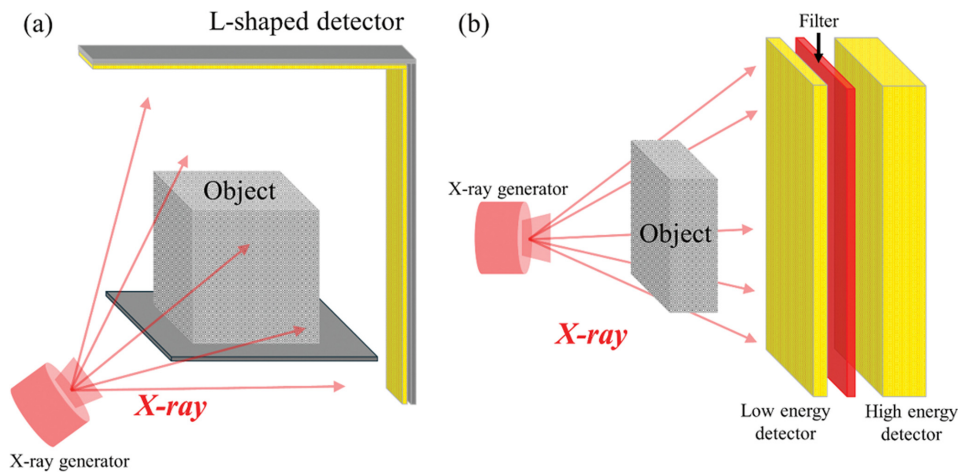


Fig. 3. (Color online) (a) Detector configuration of an L-shaped security screening system enabling multi-view X-ray acquisition to reduce object overlap. (b) Schematic of a dual-energy X-ray inspection system for material discrimination based on energy-dependent attenuation characteristics.

3(b)는 이중에너지 기법에 사용되는 대표적인 검출 구성을 나타내며, 저에너지와 고에너지 대역에서 획득된 두 개의 투과 신호를 이용하여 물질의 에너지 의존적 감쇠 특성을 분석하는 방법이다. 보안검색에 사용되는 에너지 영역에서 선감쇠계수 $\mu(E)$ 는 주로 광전효과와 콤프턴 산란의 선형결합으로 표현될 수 있으며, 다음과 같이 기술된다.

$$\mu(E) = a_{PE}f_{PE}(E) + a_{CF}f_C(E) \quad (2)$$

식(2)에서 $f_{PE}(E)$ 와 $f_C(E)$ 는 각각 광전효과와 콤프턴 산란의 에너지 의존 함수를 나타내고, a_{PE} 와 a_C 는 각 물질에서 상호작용 성분의 가중 계수를 의미한다. 물체 내부의 위치 r 에서 에너지 E 에 따른 선감쇠계수의 경로 적분으로 정의되는 감쇠 신호는 식(3)과 같이 표현될 수 있다. 여기서 $p(E)$ 는 에너지 E 에서 측정된 투영 감쇠 신호를 의미하며, $\mu(r, E)$ 는 위치 r 와 에너지 E 에 따라 달라지는 선감쇠계수, L 은 엑스선의 진행 경로를 나타낸다.

$$p(E) = \int_L \mu(r, E)dl \quad (3)$$

이중에너지 엑스선 시스템에서는 저에너지 및 고에너지 영역에서 측정된 투영 신호를 바탕으로 감쇠 성분을 광전효과와 콤프턴 산란의 두 기저 성분으로 분해할 수 있다. 이때 p_L 와 p_H 는 각각 저에너지 및 고에너지 영역에서 획득된 투영 신호이고, E_L 와 E_H 는 각 대표 에너지를 의미한다. 이 관계는 식(4)와 같은 행렬 형태로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_L \\ p_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{PE}(E_L) & f_C(E_L) \\ f_{PE}(E_H) & f_C(E_H) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{PE} \\ A_C \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 A_{PE} 와 A_C 는 각각 광전효과와 콤프턴 산란 성분에 대한 선적분 계수를 의미한다. 식(4)는 두 에너지 대역에서 획득된 두 개의 독립적인 측정값을 이용하여 두 성분을 분리하여 추정할 수 있음을 보여주며, 이는 이중에너지 기반 물질 구분의 수학적 근거가 된다. 이상적인 단색 조건과 균질 단일물질을 가정할 경우, 저에너지와 고에너지 투과 강도 I_L 및 I_H 로부터 식(5)의 이중에너지 엑스선의 비율을 R 값으로 정의할 수 있으며, 물질의 에너지 의존적 감쇠 특성을 반영하는 지표이다. 여기서 I_{0L} , I_{0H} 는 각각 저에너지 및 고에너지에서의 입사 강도이고, I_L , I_H 는 대상 물체 통과 후 측정된 투과 강도이다.

$$R = \frac{\ln(I_{0H}/I_H)}{\ln(I_{0L}/I_L)} \quad (5)$$

R 값은 물질의 에너지 의존적 감쇠 특성을 반영하는 경험적

지표이지만, 실제 시스템에서는 다색 스펙트럼, 선속 경화 현상, 산란 및 검출기 응답 특성의 영향으로 인해 근사적으로만 해석될 수 있다. 따라서 실제 보안검색에서는 구성 물질 분석과 의사색채 시각화를 결합하여 물질 분별 성능을 향상시킨다[20-26].

3. 컴퓨터단층촬영 기반 보안검색기와 대형 컨테이너 검색 시스템

컴퓨터단층촬영 기반 체적 영상 획득 방법은 엑스선원과 검출기가 대상 주위를 회전하며 다각도의 투영 데이터를 수집하고, 이를 필터보정 역투영과 같은 수학적 재구성 알고리즘을 통해 단면 및 3차원 체적 영상으로 복원하는 기술이다. 이러한 영상화 과정은 2차원 투과 영상에서 근본적으로 발생하는 구조적 중첩 문제를 크게 완화하며, 위험물의 위치, 형상 및 내부 구조를 복셀 단위로 평가할 수 있게 한다. 재구성된 CT 영상의 각 복셀은 해당 위치의 유효 감쇠 특성을 반영하므로, 단순 형상 정보뿐 아니라 밀도 분포와 내부 물질 불균질성에 대한 평가에도 활용할 수 있다. 또한 이중에너지 CT를 적용할 경우 저에너지 및 고에너지 영상 간 감쇠 차이를 이용한 구성 물질 분석이 가능하며, 이를 통해 전자 밀도와 유효원자번호를 추정함으로써 폭발물, 마약, 리튬이온 배터리 등 특정 위험물의 분별 정확도를 향상시킬 수 있다. 그러나 CT 기반 보안검색 기술은 재구성 연산에 따른 처리 시간 증가, 시스템 비용 상승 등 기술적 제약을 동반하므로, 실제 보안검색 환경에서는 탐지 정확도와 처리량을 동시에 만족시키는 방향의 기술 고도화가 요구된다. 이러한 기술적 특성을 기반으로 상용화된 보안검색용 CT 시스템의 예를 Fig. 4에 제시하였다. Fig. 4(a)는 Rapiscan Systems의 920CT 외형을 나타내며, Fig. 4(b)는 해당 시스템에서 획득된 단층 영상의 예시를 보여준다. 920CT는 다각도 투영 데이터를 기반으로 고해상도 3차원 체적 영상을 재구성하여 2차원 엑스선 영상의 중첩 한계를 완화하고, 이중에너지 기반 물질 분석 및 자동 폭발물 탐지 기능을 통해 보안검색 성능을 향상시키는 대표적 CT 방식의 검색 시스템이다[27-32].

추가로 항만 및 국경 지역의 대형 화물·컨테이너 검색에서는 두꺼운 차폐 구조와 고밀도 적재물에 대한 충분한 투과력을 확보하기 위해 선형가속기 기반의 6/9 MeV급 고에너지 엑스선이 사용된다. 그러나 고에너지 엑스선 영상은 대형·고밀도 화물 내부를 수 m 수준까지 투과할 수 있는 장점이 있는 반면, 고에너지 영역에서는 감쇠계수의 원자번호 의존성이 상대적으로 약해져 물질 분별 성능이 제한될 수 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 최근에는 엑스선이 제공하는 형상·밀도 정보와 함께, 중수소와 삼중수소 반응에서 생성되는 14.1 MeV 중성자를 이용하여 원소 조성 정보를 추가적으로

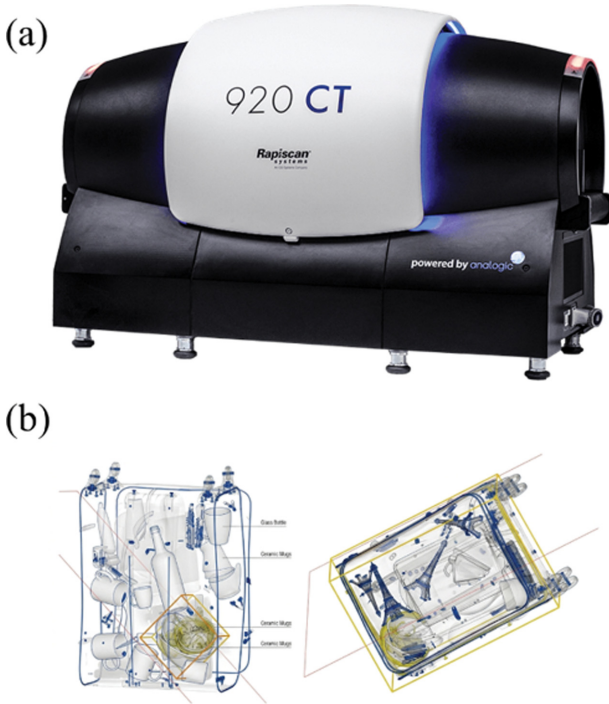


Fig. 4. (Color online) (a) Exterior view of the Rapiscan 920CT system for baggage security screening. (b) Reconstructed CT slice showing cross-sectional internal structures with reduced structural superposition compared with conventional projection X-ray imaging.

획득함으로써, 금속, 비금속, 유기물 및 무기물에 대한 분별 성능을 향상시키려는 복합방사선 보안검색 기술이 개발되고 있다[33-35].

IV. 인공지능 기반 위험물 자동 탐지 기술

1. 2차원 엑스선 영상 기반 딥러닝 탐지 기술

보안검색 분야에서 인공지능 기반 자동 위험물 탐지 기술은 판독 요원 중심의 수동 판독을 보완하기 위한 핵심 기술로 자리 잡고 있다. 그러나 2차원 투과 엑스선 영상은 투영 특성상 다수의 물체가 중첩되어 나타나며, 이로 인해 객체의 경계가 불명확해지고 폐색이 발생하여 위험물 판별에 한계가 있다. 이에 따라 최근 연구는 단순 분류를 넘어 객체 탐지, 이상 탐지, 새로운 금지물품 범주에 대한 탐지까지 포함하는 방향으로 확장되고 있다. 특히 2차원 투과 영상은 보안검색에서 가장 널리 활용되는 데이터 형태로, 이를 분석하기 위한 핵심 모델로는 합성곱신경망(Convolutional Neural Network, CNN)과 트랜스포머 기반 객체 탐지 기법이 주로 사용된다 [36,37].

대표적인 방법으로는 Faster R-CNN, YOLO(You only look once) 계열, DETR(Detection Transformer) 기반 객체 탐지 기술 등이 있으며, 이들 모델은 총기류, 도검류, 폭발물

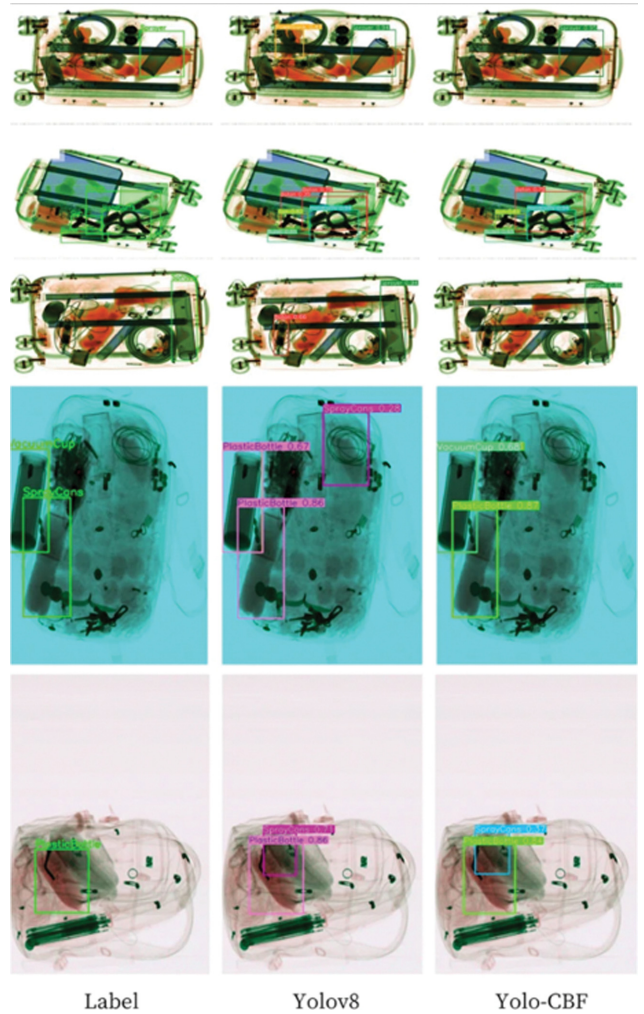


Fig. 5. (Color online) Representative example of AI-based contraband detection in X-ray security images using a lightweight YOLOv8-based object detector, showing automatic localization of hazardous items in cluttered baggage imagery. Reproduced from Fang et al. [40].

모의체 등의 위험 물체를 영상 내에서 자동으로 검출한다. Faster R-CNN은 RPN(Region Proposal Network) 신경망을 도입하여 객체가 존재할 가능성이 높은 후보 영역을 생성한 뒤 객체를 탐지하는 2단계 방식으로 높은 정확도를 보이나 복잡한 구조로 인한 느린 검출 속도가 단점이다. YOLO 계열 모델은 단일 단계 탐지 구조를 기반으로 객체의 위치 추정과 분류를 동시에 수행함으로써 높은 계산 효율성이 있으므로 실시간 보안검색 환경에 적합하다. Fig. 5는 경량화 YOLOv8 기반 객체 탐지 알고리즘을 엑스선 보안검색 영상에 적용하여 위험물품을 자동 식별한 대표적 예를 보여준다. 검출된 객체는 바운딩 박스와 분류 결과로 시각화되며, 이는 복잡한 수하물 영상에서도 딥러닝 기반 탐지 모델이 위험물의 위치와 종류를 효과적으로 판별할 수 있음을 시사한다. DETR 계열 모델은 set prediction 기반의 end-to-end 학습

구조를 통해 기존 비최대역제에 대한 의존도를 낮추고 검침이 심한 장면에서의 검출 성능 개선이 보고되고 있다.

특히 수하물 검색 영상은 다수의 물체가 중첩되어 객체 경계가 모호하게 나타나므로, Mask R-CNN 계열과 같은 인스턴스 분할 기반 접근을 통해 위험물 영역을 배경 및 타 물체로부터 픽셀 단위로 분리하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

이중에너지 엑스선 보안검색 시스템에서는 저·고에너지 투과 영상으로부터 물질의 상대 감쇠 특성을 분석하여 물질의 유효원자번호에 상응하는 물질 분류 지표를 산출하고, 이를 기반으로 자동 폭발물 탐지 알고리즘에 활용하여 유기물·무기물·금속류를 구분한다. 최근에는 이러한 물질 특성 데이터와 객체 탐지 모델을 결합하여 형상 정보와 물질 정보를 동시에 고려한 무기류 및 금지물품 탐지의 자동화 수준을 높이는 방향으로 기술이 발전하고 있으며, 학습데이터 부족 문제를 완화하기 위해 생성적 적대 신경망(Generative Adversarial Network, GAN) 및 확산 모델을 활용한 합성 엑스선 영상 생성, 데이터 증강, 반지도 학습 및 도메인 적응 기반 접근이 활발히 연구되고 있다[38-41].

2. 3차원 CT 영상 기반 AI 탐지

최근 공항 보안검색 시스템에서는 3차원 CT 기반 체적 영상이 도입됨에 따라, 3D 딥러닝 모델의 적용이 점진적으로 확대되고 있다. CT 영상은 복셀 단위의 선감쇠계수 분포 정보를 제공하므로, 2차원 투과 영상에서 발생하는 구조적 중첩 문제를 근본적으로 완화할 수 있는 기하학적 장점을 가진다. 3D CNN 기반 모델은 물체의 형상, 부피 및 공간적 정보를 통합적으로 학습할 수 있어 폭발물 및 리튬이온 배터리와 같은 위험 물질 탐지에 있어 유리한 특성을 보인다. 또한 이중에너지 CT 시스템에서는 상이한 에너지 스펙트럼에서의 감쇠 특성 차이를 이용해 유효원자번호에 대응하는 물질 지표 및 상대 전자밀도 정보를 추정할 수 있으며, 이러한 물질 특성 영상을 영상 기반 분석 또는 인공지능 모델과 결합하려는 연구가 보고되고 있다. 예를 들어, 저에너지 영상과 고에너지 영상, 유효원자번호 맵을 다중 채널로 결합하면 단순 형상 기반 탐지 대비 물질 구분 성능 향상이 가능하다. 이는 형상 기반 특징과 이중에너지로부터 추정된 물질 특성 정보를 동시에 활용하는 융합 탐지 기술로, 차세대 보안검색 인공지능 기술의 중요한 발전 방향으로 평가될 수 있다. 다만 3차원 CT 영상 기반 딥러닝은 높은 메모리 요구량과 학습 데이터 구축 비용, 실시간 추론 성능 확보의 한계 등으로 인해 실제 현장 적용에는 추가적인 최적화가 필요하다.

인공지능 기반 위험물 탐지 기술은 입력 영상의 형태에 따라 2차원 투과 영상 기반 접근과 3차원 CT 기반 접근으로 구분될 수 있으며, 각 접근법은 성능, 계산 복잡도 및 현장

적용성 측면에서 서로 다른 장단점을 가진다. 2차원 엑스선 영상 기반 인공지능 모델은 계산 효율이 높고, 기존 검색 장비 및 대규모 축적 데이터와의 호환성이 우수하여 실시간 검색 환경에 적용하기에 유리하다. 그러나 투영 영상의 특성상 물체 중첩과 폐색의 영향을 크게 받으므로 구조적 모호성이 존재한다. 반면 3차원 CT 기반 인공지능 모델은 복셀 단위의 공간 정보를 활용할 수 있어 위험물의 위치와 형상을 보다 명확히 파악할 수 있으며, 구조적 중첩 문제를 완화할 수 있다는 장점이 있다. 또한 이중에너지 CT와 결합할 경우 물질 특성 정보까지 함께 활용할 수 있어 물질 분별 측면에서도 유리하다. 다만 3차원 접근은 높은 계산 비용, 대용량 학습데이터 구축의 어려움, 실시간 처리 최적화의 필요성 등으로 인해 실제 현장 적용에는 추가적인 기술적 보완이 요구된다[42-46].

V. 결론 및 고찰

엑스선 영상은 인체 내부 구조를 비침습적으로 관찰할 수 있는 영상 수단으로 의료영상과 산업 비파괴검사 분야에서 핵심 기술로 발전해 왔다. 특히 물체를 비파괴 방식으로 투과·관찰할 수 있는 특성은 구조물 결합 검사, 재료 분석, 품질 관리 등 다양한 산업 영역으로 확장되었고, 이러한 기술적 장점을 활용하여 공항과 항만의 위험물 탐지를 위한 보안검색 분야로 확장되어 엑스선 기술은 내부 구조를 신속하고 효율적으로 확인할 수 있는 수단으로 활용되며, 국가 안전 인프라의 핵심 구성 요소로 정착하였다.

그러나 최근 국제 물류 및 여객 이동의 지속적 증가와 함께 마약, 폭발물, 위험물품의 은닉 수법이 고도화·지능화됨에 따라 기존 2차원 투과 영상 기반 검색 시스템은 물체 중첩 및 밀도 유사 물질 간 판별 한계로 인해 오탐지와 미탐지의 위험이 상존하여 정밀하고 안정적인 위험물 탐지에 한계로 작용한다. 이러한 한계를 보완하기 위하여 발전된 영상 획득 기술과 물질 분별 기법, 그리고 인공지능 기반 탐지 기술의 진화 방향을 논의하였다.

이중에너지 기반 물질 분해 기술, CT 기반 검색 장비, 고해상도 검출기 및 스펙트럴 영상 기술 등 고도화된 하드웨어 인프라의 도입은 필수적인 요구사항으로 인식되고 있다. 이중에너지 및 스펙트럴 기반 영상 기술은 서로 다른 에너지 영역에서의 감쇠 특성 차이를 분석하여 유효원자번호에 상응하는 물질 분류 지표와 상대 밀도 정보를 추정함으로써, 단순 영상 판독을 넘어 물질 특성의 물리 기반 정량 해석을 가능하게 한다. 또한 3차원 CT 기반 체적 영상은 복셀 단위 감쇠계수 분포를 제공하여 2차원 영상에서 발생하는 중첩 문제를 구조적으로 완화하고, 고정밀 물질 판별 체계를 구축할 수

있는 기반을 제공한다. 더 나아가 광자계수형 검출기와 FPGA(Field Programmable Gate Array)와 같은 고속 신호 처리 기술을 포함한 시스템 통합 설계 역량 확보는 높은 정확도와 실시간 처리 요구를 동시에 만족하는 차세대 검색 플랫폼으로의 전환을 가능하게 할 것이다.

탐지 알고리즘 측면에서도 패러다임 전환이 진행되고 있다. 최근에는 CNN 및 트랜스포머 기반 객체 검출 모델이 도입되어 자동 위협 탐지의 정밀도를 향상시키고 있으나, 향후에는 단순 객체 검출을 넘어 감쇠 특성, 전자밀도 등 물리 기반 특징과 형상 기반 특징을 통합적으로 활용하는 융합 탐지 구조로 발전할 필요가 있다. 특히 이중에너지 기반 물질 분해 결과와 CT 기반 밀도 추정 정보를 딥러닝 모델과 결합할 경우, 단순 형상 인식 대비 탐지 신뢰도와 강건성을 높여 위협물 탐지 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

최근 국내 마약 밀반입 사례의 증가와 같은 보안 위협 환경의 변화는 정밀 물질 분별 기술과 인공지능 기반 자동 탐지 시스템의 통합적 발전 필요성을 더욱 부각시키고 있다. 본 논문에서 논의한 이중에너지 기반 물질 분해, CT 기반 체적 영상화, 고도화된 검출기 기술 및 인공지능 기반 자동 탐지 연구들을 종합해 볼 때, 보안검색 기술은 물리 기반 정량 분석과 데이터 기반 지능형 탐지 알고리즘의 융합 방향으로 발전하고 있으며, 이러한 접근은 향후 보안검색 시스템의 탐지 정확도와 신뢰성을 동시에 향상시킬 수 있는 중요한 발전 방향으로 사료된다.

References

- [1] M. G. Parker, A. Muhl-Richardson, and G. Davis, *Appl. Ergon.* **105**, 103834 (2022).
- [2] X. Yang, T. Lan, and Y. Xu, *IEEE Access* **13**, 106805 (2025).
- [3] A. Cordova, *J. Transp. Secur.* **15**, 141 (2022).
- [4] R. Kayalvizhi, S. Malarvizhi, S. D. Choudhury, and A. Topkar, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **69**, 1923 (2022).
- [5] D. Mery, D. Saavedra, and M. Prasad, *IEEE Access* **8**, 145620 (2020).
- [6] K. Wells and D. A. Bradley, *Appl. Radiat. Isot.* **70**, 1729 (2012).
- [7] S. Malarvizhi, R. Kayalvizhi, S. D. Choudhury, and A. Topkar, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **68**, 1296 (2021).
- [8] K. Moshkbar-Bakhshayesh, H. Afarideh, and R. Azimirad, *Radiat. Phys. Chem.* **212**, 111180 (2023).
- [9] O. E. Wetter, *J. Forensic Radiol. Imaging* **1**, 152 (2013).
- [10] S. Prabhu, D. K. Naveen, S. Banger, and B. S. Bhat, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1712**, 012036 (2020).
- [11] G. G. Poludniowski, *Med. Phys.* **34**, 2175 (2007).
- [12] H. Ebel, *X-Ray Spectrom.* **28**, 255 (1999).
- [13] G. M. Blake and I. Fogelman, *Semin. Nucl. Med.* **27**, 210 (1997).
- [14] L. Kocsis, P. Herman, and A. Eke, *Phys. Med. Biol.* **51**, N91 (2006).
- [15] P. M. Shikhaliev, *Phys. Med. Biol.* **51**, 4267 (2006).
- [16] W. Zhou, J. I. Lane, M. L. Carlson, M. R. Bruesewitz, R. J. Witte, K. K. Koeller, L. J. Eckel, R. E. Carter, C. H. McCollough, and S. Leng, *AJNR Am. J. Neuroradiol.* **39**, 1733 (2018).
- [17] M. Vecsey-Nagy, G. Tremamunno, U. J. Schoepf, C. Gnasso, E. Zsarnóczy, N. Fink, D. Kravchenko, M. C. Halfmann, G. S. Laux, J. O'Doherty, B. Szilveszter, P. Maurovich-Horvat, I. M. Kabakus, P. S. Suranyi, A. Varga-Szemes, and T. Emrich, *Circ. Cardiovasc. Imaging* **17**, e017112 (2024).
- [18] S. U. Khan, I. U. Khan, I. Ullah, N. Saif, and I. Ullah, *J. Xray Sci. Technol.* **28**, 481 (2020).
- [19] V. Rebuffel and J. M. Dinten, *Insight* **49**, 589 (2007).
- [20] R. E. Alvarez and A. Macovski, *Phys. Med. Biol.* **21**, 733 (1976).
- [21] P. Evans, *Secur. J.* **18**, 19 (2005).
- [22] G. Zentai, *Int. J. Signal Imaging Syst. Eng.* **3**, 13 (2010).
- [23] B. Ma, T. Jia, M. Li, S. Wu, H. Wang, and D. Chen, *IEEE Trans. Inf. Forensics Security* **19**, 3866 (2024).
- [24] G. Chen, G. Bennett, and D. Perticone, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **261**, 356 (2007).
- [25] R. K. Jain and T. Vokes, *J. Clin. Densitom.* **20**, 291 (2017).
- [26] P. Ran, L. Yang, T. Jiang, X. Xu, J. Hui, Y. Su, C. Kuang, X. Liu, and Y. Yang, *Adv. Mater.* **34**, 2205458 (2022).
- [27] L. W. Goldman, *J. Nucl. Med. Technol.* **35**, 115 (2007).
- [28] T. Wyssenbach, K. Kaufmann, and A. Schwaninger, *Int. J. Hum.-Comput. Interact.* **42**, 5781 (2026).
- [29] H. Gao, L. Zhang, Z. Chen, Y. Xing, H. Xue, and J. Cheng, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **60**, 3955 (2013).
- [30] J. Hofmann, A. Flisch, and A. Obrist, *NDT E Int.* **37**, 271 (2004).
- [31] W. Zhu, R. Zhao, X. Tang, and M. Li, *Radiat. Meas.* **177**, 107274 (2024).
- [32] 920CT Computed Tomography Baggage Inspection System, Rapiscan Systems Web. <https://www.rapiscansystems.com/en/products/920ct>.
- [33] B. D. Sowerby and J. R. Tickner, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **580**, 799 (2007).
- [34] Y. Liu, B. D. Sowerby, and J. R. Tickner, *Appl. Radiat. Isot.* **66**, 463 (2008).
- [35] J. Y. Park, J. Mun, J. H. Lee, Y. H. Yeon, M. Chae, M. Lee, and N. H. Lee, *Appl. Sci.* **12**, 9775 (2022).
- [36] S. Akcay, M. E. Kundegorski, C. G. Willcocks, and T. P. Breckon, *IEEE Trans. Inf. Forensics Security* **13**, 2203 (2018).
- [37] D. Vukadinovic and D. Anderson, *JRC Sci. Policy Rep.*, EUR 31123 (2022).
- [38] K. H. Shibly, S. K. Dey, M. T. U. Islam, and M. M. Rahman, *Inform. Med. Unlocked* **20**, 100405 (2020).
- [39] L. Han, C. Ma, Y. Liu, J. Jia, and J. Sun, *Electronics* **12**, 4208 (2023).
- [40] Y. Fang, C. Xu, and Y. Zhang, *Sci. Rep.* **14**, 25031 (2024).

- [41] Y. Wei, Z. Zhu, H. Yu, and W. Zhang, *Phys. Lett. A* **400**, 127306 (2021).
- [42] A. Mouton and T. P. Breckon, *J. Xray Sci. Technol.* **23**, 531 (2015).
- [43] W. Alakwaa, M. Nassef, and A. Badr, *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* **8**, 409 (2017).
- [44] S. More, J. Singla, S. Verma, Kavita, U. Ghosh, J. J. Rodrigues, A. S. Hosen, and I. H. Ra, *IEEE Access* **8**, 126333 (2020).
- [45] J. Wu, X. Xu, and J. Yang, *IEEE Access* **11**, 45416 (2023).
- [46] W. Fang and L. Li, *Results Phys.* **35**, 105406 (2022).