

핵테러/방사능테러 탐지 기술 현황 및 국내 탐지체계 구축 방안에 관한 연구

곽성우, 장성순, 이정훈, 유호식
한국원자력통제기술원

2009년 4월 16일 접수 / 2009년 6월 12일 1차수정 / 2009년 7월 1일 채택

1990년대 이후부터 현재까지 일련의 사건들은 - 1995년 러시아 국립공원에서 매설된 오염폭탄 발견, 2001년 9/11테러, 2003년 알카에다 오염폭탄 실험 증거 발견 등 - 방사성물질(본 논문에서 언급한 “방사성물질”은 “핵물질사용후핵연료·방사성동위원소”를 말함)을 이용한 핵테러 및 방사능테러(본 논문에서는 “핵테러 및 방사능테러”를 간단히 “핵테러/방사능테러”로 표시함)가 공상과학소설이 아닌 실제적으로 발생가능할 심각한 위협임을 보여준다. 이에 따라 세계는 새롭게 대두된 위협에 효과적으로 대응하기 위해 방사성물질에 대한 보안(security)과 물리적방호(physical protection)를 강화하고, 방사성물질 불법거래 예방 및 대응체제를 구축하도록 요구하고 있다. 우리나라는 이러한 국제적 추세에 부응하기 위해, 관련 법 체제를 재개정하고 국제협약 혹은 기구에 합의하거나 가입하였다. 본 논문에서는 핵테러/방사능테러 예방의 일환으로 방사성동위원소에 비해 상대적으로 복잡한 붕괴 과정을 가진 핵물질의 물리적 특성을 살펴보고, 현재 운영되고 있는 핵테러/방사능테러 탐지 장비들의 특성을 파악한다. 검토된 장비들의 특성과 함께 국외에서 국내로 불법 유입된 방사성물질이 목표 지점까지 도달되는 과정, 국내 지형적 특징 그리고 다중 방어적 개념을 고려하여 핵테러/방사능테러 탐지체계 구축 방안을 제안한다. 본 논문은 핵테러/방사능테러로부터 국민의 건강, 안전 그리고 환경을 보호하는데 중요한 기여를 할 것으로 판단된다.

중심어: 핵테러, 방사능테러, 불법거래, 불법 운반, 핵물질, 방사성물질

1. 서론

핵무기를 제외하고 1990년대 이전에는 방사성물질을 이용한 위협은 중요시되지 않았다. 그러나 1990년 이후 세계 정세 변화로 핵물질을 포함한 방사성물질의 보안체계가 약화되어 방사성물질의 밀수 및 불법 거래가 증가됨에 따라 이를 이용한 악의적 행위가 실질적 위협으로 인식되기 시작하였다. 특히 1995년과 1998년 러시아와 체첸에서 오염폭탄(dirty bomb)의 발견, 2003년 아프가니스탄에서 발견한 알카에다의 오염폭탄 제조 증거 발견¹⁾, 그리고 2006년 11월 ²¹⁰Po를 이용한 러시아 연방 보안국 (Russian Federal Security Service) 요원의 암살 사건 등은 핵테러/방사능테러가 현재 우리가 직면한 중대한 위협임을 보여주는 실증적인 예이다. 다행스럽게도 아직까지 우리나라에서 방사성물질을 이용한 인위적·악의적 행위가 발생되지 않았다. 그러나 1,800여개 이상의 방사성동위원소 이용 업체²⁾, 원자력발전을 위한 빈번한 핵물질(핵연료물질 및 핵원료물질) 이송, 그리고 공항항만의 많은 수출입 물량을 고려하였을 때 방사성물질의 불법 거래 및 불법

운반, 그리고 이를 이용한 테러의 가능성은 결코 무시할 수 없다고 판단된다. 국제 사회는 핵테러/방사능테러에 대비하기 위해 다양한 예방 및 대응체제를 구축하고있다³⁻⁶⁾. 이러한 국제 상황에 따라 국내에서는 공항_항만에서 방사성물질 검색 시스템 구축 방안을 비롯한 방사능테러 예방 및 대응 기술에 관한 연구를 수행된 바 있다^{7,8)}. 핵테러/방사능테러 예방 시스템 구축에 있어서 중요한 사항은 테러에 이용될 방사성물질 이동 경로를 고려하여 다중방어적 개념을 적용하는 것이다. 따라서 본 연구는 기존 연구에서 고려하지 않은 국내 특수한 지형적 상황과 도로망을 고려하여 방사성물질의 불법 거래와 불법 운반을 예방하기 위한 다중방어적 국가 차원의 핵테러/방사능테러 탐지체계 구축방법을 제안한다.

2. 탐지 물질

위험한 방사성물질을 효과적으로 검색하려면 먼저 탐지 대상 물질의 방사선적 특징을 이해해야 한다. 핵테러/방사능테러에 이용될 가능성이 있는 물질은 우리나라와 플루토늄을 비롯한 핵물질, 사용후핵연료 그리고 방사성동위원소가 있다. 방사성동위원소의 붕괴 사슬은 핵물질에 비해 간단하므로 본 연구에서는 다루지않고 상대적으로 복잡한 붕괴과정을 가진 핵물질의 물리적 특징만을 살펴본다.

책임저자: 곽성우, swkwak@kinac.re.kr, 한국원자력통제기술원 대전시 유성구 엑스포로 573번지

2.1 우라늄(U) 물질

우라늄 원소는 다양한 동위원소 비율로 구성되어 있다. 7.13×10^8 년의 반감기를 가진 ^{235}U 는 방사능 붕괴를 통해 185 keV 감마선을 $4.3 \times 10^4 \text{ \#(g \cdot sec)}^{-1}$ 비율로 방출한다[9]. 이 185 keV 감마선은 우라늄 원소에서 방출되는 다른 감마선과의 상대적 평가에 의해 ^{235}U 농축도 측정을 위해 사용된다. 그러나 물질에 대한 투과력이 낮아 차폐된 우라늄의 불법 거래 탐지 목적으로 사용되기는 어렵다. 한편 고농축 우라늄이라 할 지라도 항상 어느 정도 이상의 ^{238}U 를 포함하고 있다. ^{238}U 붕괴 과정 중 생성된 방사성동위원소 ^{234}Pa 는 여기 상태에서 안정 상태로 내려가면서 1.001 MeV 감마선을 약 $81 \text{ \#(g \cdot sec)}^{-1}$ 비율로 방출하는데 우라늄 불법거래 탐지에 이 감마선이 사용된다. 다른 우라늄 동위원소 ^{232}U 는 붕괴 생성물 중 하나인 딸 핵종 ^{212}Bi 의 방사능붕괴에 의해 $2.68 \times 10^{11} \text{ \#(g \cdot sec)}^{-1}$ 비율로 강한 2.614 MeV 감마선을 방출한다. ^{232}U 는 투과력이 높고 고에너지 감마선을 방출하지만 그 양이 극히 작기 때문에 우라늄 불법 거래 탐지 목적으로 이용할 수 없다. 감마선 뿐만 아니라 ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U 는 자발 핵분열 반응에 의해 중성자도 방출하지만 그 양이 작아 불법 거래 탐지에 이용되지 않는다.

2.2 플루토늄(Pu) 물질

플루토늄도 붕괴 과정에서 여러 감마선을 방출한다. 그 중 상대적으로 방출 비율이 큰 것은 645.98, 662.0, 722.47, 769.0 keV 감마선이다. 414.0, 645.98 과 769.0 keV 감마선은 ^{239}Pu 의 붕괴에 의해 발생하고, 208.0, 662.0 과 722.47 keV는 ^{241}Pu 붕괴로 인해 발생한다. 208 keV는 $2.0 \times 10^7 \text{ \#(g \cdot sec)}^{-1}$, 414 keV는 $3.4 \times 10^4 \text{ \#(g \cdot sec)}^{-1}$, 769.0 keV는 $252 \text{ \#(g \cdot sec)}^{-1}$ 비율로 방출된다[9]. 769 keV 감마선을 제외하고, 다른 감마선은 투과력이 낮아 플루토늄 불법 거래에 이용되기 어렵다. 769 keV 감마선이 플루토늄 불법거래 및 불법 운반 탐지에 사용될 수도 있지만 중성자가 감마선 보다 투과력이 좋고 플루토늄의 높은 중성자 방출을, 낮은 중성자 환경방사능 때문에 실제 현장에서는 중성자가 주로 이용된다.

플루토늄은 우라늄 동위원소에 비해 더 쉽게 자발핵분열

을 하므로 더 많은 중성자를 방출한다. 짝수 원자번호를 가진 핵종에서 나온 중성자가 대부분이고 홀수 원자번호 핵종에 의해 방출된 중성자는 무시할 수 있을 정도로 작다. 중성자 방출량은 플루토늄 양, 화학적 형태 그리고 동위원소 조성에 따라 다르다. 플루토늄 혼합물은 그 등급에 따라 ^{239}Pu 는 50%~95%, ^{240}Pu 는 5%~30% 정도 존재하며 나머지 핵종(^{238}Pu , ^{235}Pu , ^{242}Pu , ^{244}Pu)은 극미량 존재한다[10]. 비록 ^{238}Pu , ^{235}Pu , ^{242}Pu , ^{244}Pu 에서 방출된 단위 질량당 중성자 수가 크지만[11] 그 존재량이 작기 때문에 실질적으로 플루토늄 혼합물에서 방출된 중성자는 ^{240}Pu 에서 나온 것이 대부분이다. 표 1은 플루토늄 등급(grade)에 따른 동위원소 구성 성분을 보여 준다 [12]. 표 2는 플루토늄 등급별 동위원소 조성, 각 동위원소의 반감기, 자발핵분열의 비율, 분열당 생성된 중성자 수를 고려하여 계산된 플루토늄 단위 무게당 방출되는 중성자 수이다 [12]. 표에서 알 수 있듯이 원자로 등급(reactor grade)과 MOX 등급 플루토늄은 핵무기 등급(weapon grade)에 비해 더 많은 ^{240}Pu 양을 포함하고 있으므로 방출되는 중성자 양이 크기 때문에 핵무기 등급 플루토늄 보다는 탐지가 더 용이하다.

3. 방사선 검출기

핵테러/방사능테러에 이용될 가능성이 있는 방사성물질은 여러 형태의 방사선(중성자, 감마선, 베타선, 알파선)을 방출한다. 그 중 알파선, 베타선, 그리고 저에너지 감마선은 투과력이 낮아 불법 거래 탐지에 사용되기 어렵다. 핵테러/방사능테러 예방을 위해 설치된 방사성물질 탐지 시스템은 그 목적에 따라 다양한 방사선 검출기를 채택하고 있다. 기존의 방사선 검출기를 감마선과 중성자 검출기로 나누어 사용 목적에 따른 검출기의 사양과 특징을 분석하였다.

3.1 감마선 검출기

감마선 검출기는 에너지 분해능 유무에 따라 전 계수기(gross counter)와 에너지 분석 검출기로 나눌 수 있다. 전 계수기로는 무선호출기형 검출기(pager)와 플라스틱 섬광체 기

Table 1. Radioisotope Composition of Grades of Plutonium.

플루토늄 준위(%)	super grade	weapon grade	reactor grade	MOX grade	FBR Blanket grade
Pu-238	0	0.012	1.3	1.9	0
Pu-239	98	93.8	60.3	40.4	96
Pu-240	2	5.8	24.3	32.1	4
Pu-241	0	0.35	9.1	17.8	0
Pu-240	0	0.022	5	7.8	0

Table 2. Neutron Emissions per Kilogram of Plutonium(by Grade).

플루토늄 준위(%)	super grade	weapon grade	reactor grade	MOX grade
	18,400	54,000	349,000	487,000

반 방사선 문형(portal) 검색기가 있다. 무선호출기형 검출기는 무선호출기와 비슷한 형태로 크기가 작고 가볍다. 따라서 핵테러/방사능테러 탐지 및 대응 업무 종사자 신체에 부착하여 주변에 방사성물질 존재 여부를 탐지하는데 사용된다. 무선호출기형 검출기는 방사성물질 탐지 능력이 가장 중요하기 때문에 방사성물질의 센서로써 감도 효율이 좋은 NaI를 주로 사용한다. 플라스틱 섬광체는 낮은 밀도로 인해 방사선과의 반응율이 작아 고유 검출 효율(inherent detection efficiency)이 작다는 단점이 있다. 그러나 저 비용으로 대면적이 가능하고, 거친 주변 환경하에서도 잘 견딘다는 장점에 공항, 항만, 국경 지대, 교통의 요충지, 그리고 중요 건물 입구(관공서등)에 설치되어, 사람, 차량, 그리고 수화물 검색을 위해 사용된다. 여러 플라스틱 섬광체 중 빛 전달율이 좋은 폴리비닐 톨루엔(polyvinyl toluene, PVT)이 가장 많이 사용된다. 외국의 실제 운영 경험에 따르면 방사성물질의 불법 거래와 불법 운반 보다는 의료 산업계에서 사용하기 위한 합법적 방사성물질 운반과 콘크리트, 화학비료, 바나나, 화장암, 시멘트 등과 같은 수화물속에 존재하는 자연 발생 방사성 물질(Nationally Occurring Radioactive Material, NORM) 운반에 의해 주로 경고 신호가 많이 발생하는 것으로 보고되었다 [13,14]. 운반 중인 적재물에 의해 방사성물질 경고 신호가 발생하면 운반 중인 차량을 멈추고 경고 신호의 원인을 확인하기 위해 2차 정밀검사를 수행하여야 한다. 2차 정밀검사는 장시간을 필요로 하기 때문에 정상적인 물류 흐름을 저해해서 경제성을 떨어뜨린다. 따라서 불필요한 2차 추가적 검사를 없애기 위해 플라스틱 섬광체 검출기를 이용한 시스템은 방사선 에너지 스펙트럼 모양을 분석하여 자연상에 존재하는 핵종인지 혹은 위협이 될 가능성이 있는 인공적인 핵종인지 판별할 수 있는 기능을 가지고 있어야 한다[15].

신속하고 효과적인 핵테러/방사능테러 예방 체제를 구축하기 위해서 방사성물질 불법 거래 및 불법 운반 탐지 시스템은 필수적이다. 운반 중인 물질 속에 방사성물질이 존재하는지 여부의 예도 추가로 중요한 정보는 그 방사성물질의 종류를 결정하는 것이다. 이는 불법 밀수 혹은 불법 운반되는 방사성물질의 양과 종류에 따라 이에 대한 대응 규모와 방법이 달라지기 때문이다. 방사성물질의 핵종을 결정하기 위해서는 방사선 에너지에 관한 정보가 필요하고 그 에너지 정보를 얻기 위한 검출기는 NaI, CZT (Cadmium Zinc Telluride), HPGe (High Purity Germanium) 검출기가 있다. NaI는 반응 효율은 좋지만 에너지 분해능은 CZT와 HPGe에 비해 떨어진다. 그럼에도 불구하고 CZT와 HPGe의 고유한 문제점(제작의 어려움, 긴 측정 시간, 냉각의 어려움, 비싼 가격) 때문에 CZT와 HPGe 보다는 NaI 검출기를 많이 사용하고 있는 추세이다. CZT는 NaI 보다 에너지 분해능이 좋지만 HPGe 보다는 나쁘다. ANSI N423.4에 의하면 핵테러/방사능테러 탐지 장비는 60초 이내에 핵종 구분이 가능해야 하나[16], 신뢰성이 있는 결과를 얻기 위해서는 CZT는 그 이상의 측정 시간을 요구한다. 또한 검출 효율 향상을 위해 대면적 센서 제작도 어려운 것으로 알려져 있다. 이와 같이 긴 측정 시간과 대 면적 센서 제작의 어려움 때문에 CZT는 짧은 측정 시간이 요구되는 핵테러/방사능테러 탐지용으로는 적당하지 않다고 판단된다. HPGe는 다른 검출기에 비해 에너지 분해능이 월등히 우수하지만 질소 냉각

방식의 불편함 때문에 실험실이 아닌 현장에서의 적용이 어렵다는 단점이 있다. 그러나 최근에 질소가 아닌 기계적 냉각 방법이 개발되어 현장 적용이 용이하게 됨에 따라 가격은 비록 고가이지만 그 이용율이 높아지고 있는 추세이다.

3.2 중성자 검출기

주변 환경에서의 낮은 중성자 선량 때문에 중성자 검출을 이용하면 방사성물질의 불법 거래 및 불법 운반을 탐지하는데는 유리하다. 중성자 검출기는 출입자, 서류 가방, 수화물 및 차량을 검색하기 위해 사용된다. 핵테러/방사능테러 탐지용 중성자 검출기로써는 우수한 감도 때문에 주로 고압 ³He 검출기를 사용한다. IAEA는 12,000 #/sec 강도를 가진 ²⁵²Cf가 1m 떨어져 있을 때, 중성자 검출기는 최소 2 #/sec 이상의 계수율을 가지도록 권고하고 있다[17]. ³He 중성자 검출기 외에 T. Köble et al 은 플라스틱 섬광체를 차량의 양면에 부착하여 중성자 방출 핵종을 검색하기 위한 시스템을 개발하기도 하였다[18]. ³He 검출기는 중성자에 대한 감도를 향상시키기 위해 적절한 두께의 폴리에틸렌으로 둘러 싸여진다. 최적의 폴리에틸렌 두께는 목표 물질의 중성자 스펙트럼(그림 1와 그림 2)에 따라 결정된다[19].

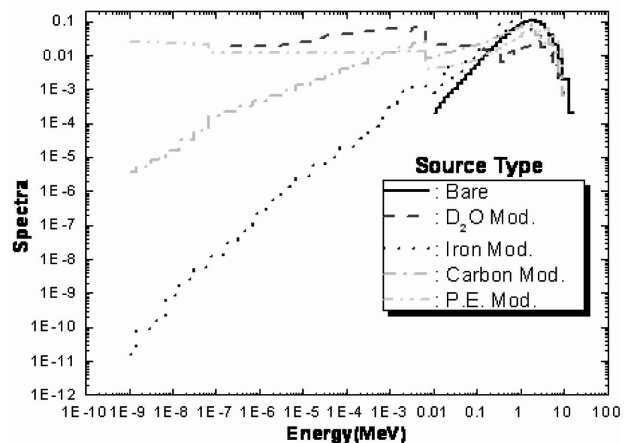


Fig. 1. Spectra of ²⁵²Cf surrounded with various moderators [15].

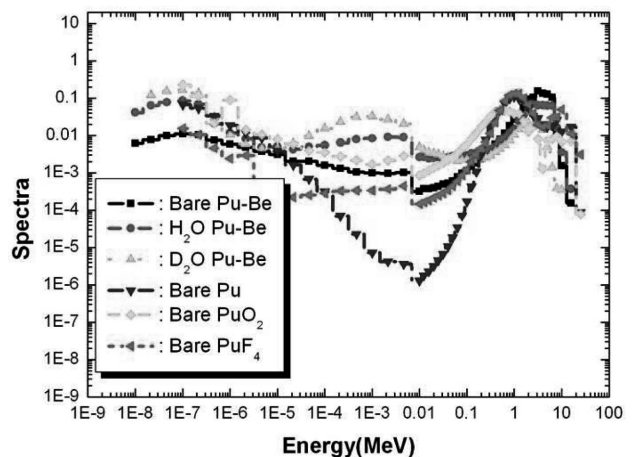


Fig. 2. Spectra of Pu-Be, Pu, PuO₂ and PuF₄ neutron sources [15].

4. 국내 핵테러/방사능테러 탐지 체계 구축 방안

핵테러/방사능테러의 목표물은 그 효과의 극대화를 위해 인구가 밀집된 도심 지역, 중요 열차역 혹은 버스 터미널, 중요 관공서, 대형 백화점, 그리고 대규모 스포츠 행사장이 될 수 있다. 테러리스트가 이들 목표물을 공격하기 위해서는 방사성물질을 국내에서 취득하거나 또한 외국으로부터 불법 밀수하여야 한다. 밀수된 방사성물질의 운반 경로를 3단계 즉, 국내로 반입, 도로를 이용한 운반, 목표 건물로의 유입으로 구분할 수 있다. 탐지 시스템 구축에 있어서 신뢰성 향상을 위해서는 다중방어적 개념 적용이 필수적이다. 효과적인 핵테러/방사능테러 예방을 위해 다중 방어적 개념을 적용하여 각 단계의 특성을 고려한 최적의 방사선 탐지 시스템 구축 방안을 제안한다.

4.1 공항·항만 검색 시스템

공항 혹은 항만은 방사성물질이 외국에서 국내로 유입되는 첫 관문이다. 불법 밀수된 방사성물질이 테러에 이용되는 것을 사전에 차단하기 위해 첫 관문인 공항항만에서의 철저한 방사성물질 검색이 이루어져야 한다. 이를 위해 미국은 자국 혹은 동맹국으로 방사성물질이 밀수되는 것을 방지하기 위해 Core program, Megaport initiative, Secure flight initiative를 국제 협력을 통해 시행하고 있다. 이러한 국제적 동향에 따라 국내 일부 공항(인천공항)과 항만(부산항, 인천항)에서는 이미 방사선 검색 시스템을 운영하고 있다[8]. 인천공항, 부산항, 인천항에 현재 설치된 시스템은 고정형 방사선 문형 검색기(Fixed radiation portal monitors)이다. 부산항과 인천항은 방사선 검색 시스템을 세관에서 운영하고 있는 반면에 인천공항은 세관이 아닌 국제택배회사(FedEx)에서 자사의 수화물을 검색하기 위해 운영하고 있다. 공항항만에서의 검색 시스템은 기존 연구결과에서 국가의 가용 가능 예산에 따라 3가지 방안으로 제시된 바 있다[9].

현재 국내에는 9개의 국제 공항과 6개의 국내 공항이 운영되고 있다. 각 공항은 엑스선 검색기를 이용하여 마약을 비롯한 밀수품 및 폭발물 검사를 수행하고 있다. 방사성물질 검색은 앞에서 언급한 바와 같이 인천공항의 한 국제택배회사에서만 운영하고 있지 일반 승객 및 수화물에 대해서는 수행되고 있지 않고 있다. 테러리스트는 항공기를 이용하여 방사성물질을 불법 운반할 가능성이 있으므로 공항의 수화물 검사 장치가 필요하다. 항공기 이용 승객과 화물이 많기 때문에 항공기 수화물 탐지 장치는 신속한 검사와 핵종 구분 능력이 무엇보다 중요하다. 따라서 이러한 요구조건을 만족시키기 위해서는 측정 시간도 짧고 에너지 분해능도 좋은 HPGe 검출기를 수화물 운송 벨트 도중에 설치하는 것이 바람직하다고 판단된다. 만약 방사선 검색 시스템과 엑스선 검색 시스템을 상호 연계하여 운영하면 그 효율성은 더욱 향상될 것이다. 이러한 장비는 국내 여러 공항중 이용 여행객 수가 많은 인천국제공항과 김포공항에 우선적으로 설치되어야 한다고 사료된다.

국제 무역의 90% 이상이 해상을 통한 선박용 컨테이너(shipment container)를 이용하여 이루어지고 있으므로 선박용 컨테이너가 방사성물질 밀수에 이용될 가능성이 가장 크다. 현재 국내는 28개 항만이 운영되고 있지만 그중에서 부산항

(73%), 평양항(11%), 인천항(10%)이 전체 컨테이너 물류량의 90% 이상을 차지한다[20]. 국내 운영되는 모든 항만에 방사선 탐지 시스템을 설치하기에는 인력 및 예산이 제한되어 있어 불가능하다. 따라서 항만의 물류 양, 항만에 대한 방사성물질 밀수자의 호감도, 항만 보안 상태, 방사성물질과 항만의 근접성, 그리고 목표물까지의 거리를 고려하였을 때, 고정형 방사선 문형 검색기(Fixed radiation portal monitors)를 부산항과 인천항에 우선적으로 설치한 것은 옳은 결정이었다고 생각한다. 특히 물동량이 더 많은 평양항 보다는 인천항이 우선되는 이유는 테러리스트의 목표물이 많은 서울과의 근접성 때문이다.

4.2 주요 교통 요충지 검색 시스템

외국에서 공항 항만까지 밀수된 것 뿐만 아니라 국내 업체로부터 불법 탈취수득한 방사성물질은 육로를 이용하여 공격하고자 하는 목표지점으로 운반될 것이다. 이는 육로, 해상, 항공 중 도로를 이용하는 방법이 가장 편리하기 때문이다. 국내 도로망을 고려하였을 때 특정 공항이나 항구에서 목표지점까지 도달하기에는 수많은 경로가 존재한다. 사실상이 모든 경우를 고려하기는 비효율적이며 불가능하므로 여러 도로 유형중(고속도로, 국도, 지방도) 편리성과 짧은 운송 시간을 고려하였을 때 고속도로를 이용할 가능성을 클 것으로 판단된다. 따라서 앞에서 불법 밀수에 이용할 가능성이 많을 것으로 예상된 공항(인천공항과 김포 공항)과 항만(부산항과 인천항)에서 서울로 진입하는 고속도로 진입로에 방사성 검출기를 설치운영하면 핵테러/방사능테러 예방에 매우 효과적일 것으로 예상된다. 국내 지형과 도로망을 고려하여 여러 고속도로 진입로중 방사성물질 불법 운반자가 취할 가능성이 높은 고속도로 진입로와 출구를 표 3과 같이 도출하였다. 표 3에 기술된 지점에 대면적 플라스틱 섬광체 기반 고정형 문형 검출기(Fixed radiation portal monitors)를 설치하여 운영하면 방사성물질 불법 거래 및 불법 운반 탐지에 매우 효과적일 것으로 사료된다. 그런데 하루중 수많은 차량이 고속도로를 이용하고 이들 중 자연발생 방사성물질(NORM)을 포함한 화물을 운송하는 차량도 많을 것이다. 이러한 차량은 방사성물질 탐지 시스템의 경보 알람을 발생시킨다. 한번 알

Table 3. The Tollgate of Expressway where Radiation Monitoring System is Recommended to be Installed.

출발도착	탐지 장비 설치 권고되는 고속도로 입·출구
인천공항	인천국제공항고속도로의 “공항입구”
김포공항	인천국제공항고속도로의 “김포공항”
부산항	- 경부고속도로의 “구서” - 부산대구 고속도로의 “삼락”
인천항	- 경인고속도로의 “도화” - 제2경인고속도로의 “문학”
서울	- 경부고속도로의 “원교”, “양재”, “서초”, “반포”, “하남” - 중부고속도로의 “하남”, “상일”, “강일”, “토평”, “남양주”, “구리”

람이 발생되면 발생된 경보 알람 확인을 위해 이동중인 차량을 정지시키고 정밀한 검색을 수행하여야 한다. 불필요한 2차 검색은 전체 물류 흐름을 방해해서 경제성을 떨어뜨리고 또한 합법적 운전자로 하여금 불만을 야기시키고 또한 민원의 소지가 많을 것으로 예상된다. 이를 방지하기 위해서는 방사선 탐지 시스템은 자연발생 방사성물질(NORM)과 핵테러/방사능테러에 이용 가능성이 있는 방사성물질을 실시간으로 신속히 구분할 수 있는 기능이 있어야 한다. 고정형 문형 검출기를 고속도로 진입로에 실제 설치하기 전에 이 구분 능력에 대한 확실한 검증 과정 거쳐서 일반 대중의 불만과 민원을 사전에 방지하여야 한다.

4.3 이동형 검색 시스템

테러리스트는 중요도로 요충지에 설치된 방사선 검색시스템에 의해 탐지되는 것을 방지하기 위해 운반 방사성물질을 철저히 차폐시키거나 혹은 검색장비가 설치된 지점을 우회할 수 있으므로 단일층의 방어체계는 비효과적이며 신뢰성도 낮다. 이러한 검색 실패에 대비해 검색행위가 다중으로 이루어지는 다중방어체계가 필요하다[21,22]. 다중 방어 체계는 테러리스트의 목적 달성을 어렵게 하거나 혹은 실수를 유발시켜 핵테러/방사능테러 예방에 기여한다. GICNT의 핵물질 탐지 관련 표준 운영지침(Model Guidelines Document for Nuclear Detection Architectures)은 탐지 시스템의 신뢰성을 향상을 위한 기본 설계 원칙으로써 중복성(redundancy), 다양성(diversity), 예측 불가능성(unpredictability), 심층방어(defense-in-depth) 개념을 적용할 것을 권고한다[23,24]. 이동형 검색시스템(mobile radiation monitoring system)은 테러리스트가 차량 탐지 장치를 우회하는 것을 방지하고, 신속하고 효과적인 핵테러/방사능테러 대응조치를 수립하기 위해 목표 지점으로부터 가능한 멀리 떨어진 지점에서 테러리스트에 의해 불법 운반되는 방사성물질을 탐지하는데 효과적이다. 이동 검색시스템은 빠르게 움직이는 차량 속에 숨겨진 방사성물질을 탐지해야 하므로 차폐외에 측정시간과 거리에 많은 제약이 있다. 이를 극복하기 위해서는 특히 감도가 좋은 방사성검출기를 이용하여야 한다. 물론 HPGe가 가장 이상적이지만, 가격과 실제 현장에 적용상의 문제점 때문에 대면적 플라스틱 섬광체 혹은 NaI 검출기도 양호할 것으로 판단된다. 중성자 검출기로는 감도가 뛰어난 ³He 검출기를 사용하는 것이 바람직하다.

4.4 건물 출입구 검색 시스템

목표물 근처에 도달한 테러리스트는 목표물 근교에서 악의적 행위를 실천에 옮길 수 있지만, 상황에 따라 방사성물질을 직접 소지하고 목표 건물에 출입할 가능성도 존재한다. 이를 방지하기 위해 금속탐지기 형태와 비슷한 방사성물질 검색시스템이 사용된다. 보행자 검색 시스템(Pedestrian monitoring system)은 건물 출입자의 방사성물질 소지 여부를 검사하는 시스템이므로 극미량의 방사성물질도 검색 가능해야 한다. 일반적으로 플라스틱 섬광체 기반 방사선 검출기를 많이 사용하며, 현재 사용중인 검출기는 대체적으로 1 μCi ¹³⁷Cs까지 측정가능하다. 중성자 방출 핵종 검색을 위해서는 ³He 검출기를 일반적으로 사용한다.

5. 결과 및 논의

핵테러/방사능테러 예방의 일환으로 본 논문에서는 국외에서 국내로 불법 유입된 방사성물질이 목표 지점까지 도달되는 과정, 국내 지형적 특징 그리고 다중 방어적 개념을 고려하여 핵테러/방사능테러 탐지체계 구축 방안을 제안하였다. 분석된 결과에 의하면, 탐지 장치를 우선적으로 설치해야 할 공항은 인천국제공항과 김포 공항이다. 탐지 장치로써는 신속하고 좋은 분해능을 가진 HPGe 검출 시스템이 공항 검색을 위해 적당할 것으로 판단된다. 도로를 이용한 불법 거래 혹은 불법 운반을 검색하기 위한 장치로는 대면적 플라스틱 섬광체 문형 검출기가 적당할 것으로 나타났다. 그 외에 불시 검문을 위해 이동형 탐지시스템과 건물 출입자 검색은 NaI 혹은 플라스틱 섬광체 검출기가 바람직한 것으로 나타났다. 본 논문에서 도출된 결론은 비용 대 효용성의 최적화를 달성하기 위한 것이다. 만약 경제적 여건을 중요시하지 않고 효용성만 고려한다면 각 단계에서 고비용-고성능 장비, HPGe를 설치하면 최대의 검색효과를 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서 제시된 방안을 시행하기에 앞서 검토되어야 할 몇가지 사항이 있다. 첫째, 주요 교통 요충지에 설치된 방사선 검색 장비의 운영 주체에 관한 문제이다. 방사능테러의 주관 기관은 교육과학기술부이다. 반면에 방사능테러 탐지 장비를 설치하고자 하는 주요 장소(고속도로 진입로등)는 국토해양부의 지도 감독을 받는 한국도로공사의 관할하에 있다. 이는 국토해양부의 협조없이 교육과학기술부의 의지만으로 실질적 이행이 어려움을 의미한다. 따라서 본 논문에서 제안한 방안을 시행하기 위해서는 상위 기관의 중재하에 교육과학기술부와 국토해양부간의 업무 조정과 협조가 선행되어야 한다고 사료된다. 둘째, 앞에서 기술한 바와 같이, 자연발생 방사성물질(NORM)로 인한 빈번한 2차 검색으로 일반 대중의 불만과 민원 발생 가능성이다. 비슷한 장비를 운영한 외국의 사례에서도 nuisance alarm으로 인한 문제점을 지적하였다. 일반 대중의 불만을 발생시키지 않기 위해서는 설치된 장비가 위험 방사성물질과 NORM을 구분할 수 있는 능력을 가지고 있어야 한다. 그럼에도 불구하고 발생하는 아주 작은 경우의 nuisance alarm은 이동형 방사선 탐지 시스템을 활용하면 의심스런 차량을 정차시키지 않고 은밀히 추적하며 검색할 수 있으므로 NORM에 의한 nuisance alarm을 국민적 수용한계까지 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부가 주관하는 원자력중장기 연구의 일환으로 수행하였습니다.

참고문헌

1. <http://www.cdi.org/terrorism/dirty-bomb.cfm>
2. 한국동위 원소협회. 방사선이 용통계 2008, p11, 2008
3. IAEA. Amendment to Convention on the Physical Protection of Nuclear Material(CPPNM), 2005
4. UN General Assembly resolution 60/78: the International Convention for the Suppression of Acts of Nuclear Terrorism, 2007
5. UN Security Council resolution 1540, 2004
6. Global Initiative to Combat Nuclear Terrorism, 2006

7. 김동일, 김도삼, 남광우, 박원중, 배구현, 신형기, 오기훈, 이재규, 한승재. 원자력 정책 연구 사업-공항-항만 방사성물질 검 색체제 구축방안 연구. 과학기술부, 2005
8. 이세열, 김석철, 김홍석, 권정완. 방사능 테러 예방 및 대응 기 술 지원체제 구축에 관한 연구. 과학기술부, 2007
9. DeVolpi A. Technologies for Detection of Nuclear Materials, International Symposium on Nuclear Physics Methods for Detection of Smuggled Explosives and Nuclear Materials. Apr. 1996.
10. Klett A. Plutonium Detection with a New Fission Neutron Survey Meter. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1999;46(4):877-879.
11. The International Commission on Radiological Protection. Radionuclide Transformations Energy and Intensity of Emissions, ICRP Publication 38. Annals of the ICRP, Vol.11-13, 1983
12. Srikrishna D, Chari AN, Tisch T. Deterrence of Nuclear Terrorism with Mobile Radiation Detectors, Nonproliferation Review. 2005 Nov.;12(3):573-614.
13. IAEA-TECDOC-1312. Detection of Radioactive Materials at Borders. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002.
14. Kouzes RT, Ely JH, Geelhood BD, Hansen RR, Lepel EA, Schweppe JE, Siciliano ER, Strom DJ, and Warner RA. Nationally Occurring Radioactive Materials and Medical Isotopes at Border Crossings. in Conf. Proc. IEEE Nuclear Science Symp., 2003
15. Ely JH, Kouzer RT, Geelhood BD, Schweppe JE, and Warner RA. Discrimination of Nationally Occurring Radioactive Material in Plastic Scintillator Material. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2004 Aug;51(4):1672-1676.
16. American National Standards Institute. Performance Criteria for Hand-held Instruments for the Detection and Identification of Radionuclides. ANSI N42.34, 2004.
17. IAEA Nuclear Security Series No.1, Technical guidance. Technical and Functional Specifications for Border Monitoring Equipment. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006.
18. Köble T, Rosenstock W, Risse M, and Peter J. Detection of Nuclear Material During Fast Road Transport. INMM 44, Annual Meeting, 2003.
19. Technical Reports Series No. 403: Compendium of Neutron Spectra and Detector Responses for Radiation Protection Purposes. IAEA, 2000.
20. <http://portal.kca.or.kr>. 한국켄테이너부두공단 포탈정보 국토해양부 컨테이너 물류양 처리.
21. IAEA INF/CIRC/225/Rev.4. The Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1999.
22. Ferguson CD and Potter WC. The Four Faces of Nuclear Terrorism. Monterey Institute of International Studies, 2004.
23. Rasmuson DM, Griffith JM, Wagner DP. OSTI ID:5831230, EGG-ISS-5020.
24. Model Guidelines Document for Nuclear Detection Architectures, draft, 2008.

A Study on Current Status of Detection Technology and Establishment of National Detection Regime against Nuclear/Radiological Terrorism

Sung-Woo Kwak, Sung-Soon Jang, Jounghoon Lee and Hosik Yoo
Korea Institute of Nuclear Non-proliferation and Control

Abstract - Since 1990s, some events - detection of a dirty bomb in a Russian nation park in 1995, 9/11 terrorist attack to WTC in 2001, discovery of Al-Qaeda's experimentation to build a dirty bomb in 2003 etc - have showed that nuclear or radiological terrorism relating to radioactive materials (hereinafter "radioactive materials" is referred to as "nuclear material, nuclear spent fuel and radioactive source") is not incredible but serious and credible threat. Thus, to respond to the new threat, the international community has not only strengthened security and physical protection of radioactive materials but also established prevention of and response to illicit trafficking of radioactive materials. In this regard, our government has enacted or revised the national regulatory framework with a view to improving security of radioactive materials and joined the international convention or agreement to meet this international trend. For the purpose of prevention of nuclear/radiological terrorism, this paper reviews physical characteristics of nuclear material and existing detection instruments used for prevention of illicit trafficking. Finally, national detection regime against nuclear/radiological terrorism based on paths of the smuggled radioactive materials to terrorist's target building/area, national topography and road networks, and defence-in-depth concept is suggested in this paper. This study should contribute to protect people's health, safety and environment from nuclear/radiological terrorism.

Keywords : Nuclear Terrorism, Radiological Terrorism, Illicit Trafficking, Illicit Transport, Nuclear Material, Radioactive Material