

대형 컨테이너 방사선 검색기 기술 및 국내 현황

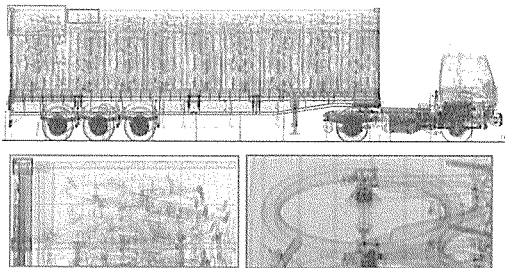


조 규 성

한국과학기술원
원자력 및 양자공학과 교수

현대 사회는 한 나라의 경제활동에 국가간 무역이 미치는 영향이 막대하며 이러한 경향은 시대의 발전에 따라 더욱 심화될 전망이다. 이러한 상황속에서 정상적인 관세 절차를 거치지 않고 불법적으로 외국의 원자재나 상품을 들여오는 은닉 밀수 역시 그 건수가 증가할 가능성이 항상 존재하고 있으며 실질적으로도 밀수 적발건수는 줄어들고 있지 않다. 이에 대

처하기 위하여 십여년전부터 꾸준히 개발되고 활용되고 있는 것이 대형 컨테이너 검색기이다. 대형 컨테이너 검색기란 국가간 수출입 화물이 항만이나 육로 국경을 통해 컨테이너 단위로 반입될 시 컨테이너 내부에 은닉된 불법 반입물을 방사선의 투과성을 이용하여 신속하고 효율적으로 검사하는 검색 장비를 말한다. 컨테이너의 크기는 수송차량이나 용도에 따라 다양하나 가장 보편적인 규격은 높이 및 너비가 2.4 m이고 길이가 20~45 feet (6~15 m)이다. 길이 20 feet 컨테이너 하나 분량의 화물을 1 TEU(twenty-foot equivalent unit)라고 한다. 검색기는 <그림 1>과 같이 컨테이너와 내부 물품의 투시영상을 만들어 내는 데 영상을 만드는 원리와 방법은 병원에서 사용하는 엑스선 투시촬영과 같다. 본 지면에서는 검색기의 기술적 특성 및 검색기의 운영에 따른 효과와 문제점을 고찰해 보고자 한다.



<그림 1> 자전거 적재 컨테이너 엑스선 검색기 영상 및
일부 확대 영상들 (대동기재 제공)

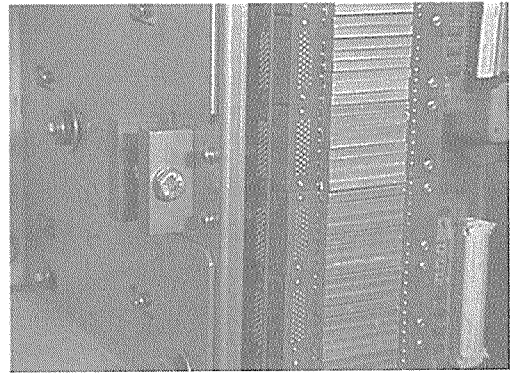
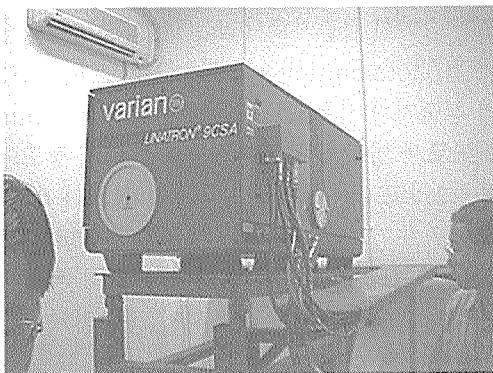
컨테이너 검색기의 기술적 특성

컨테이너 검색기에 활용되는 방사선은 크게 엑스선, 감마선 그리고 중성자 세가지가 있다. 이 중에서 엑스선 검색기가 가장 널리 사용되고 있으며 그 이유는 검색기 가격 대비 성능이 우수하기 때문이다. 현재 컨테이너 검색기를 제작 공급하는 주 업체로는 RAPISCAN(미국), AS&E(미국), BIR(미국), SAIC(미국), Heimann(독일), Nuctech(중국)등이 있다. 국내에서도 최근 들어 일부 벤처기업을 중심으로 엑스선 검색기의 개발을 시도하고 있다.

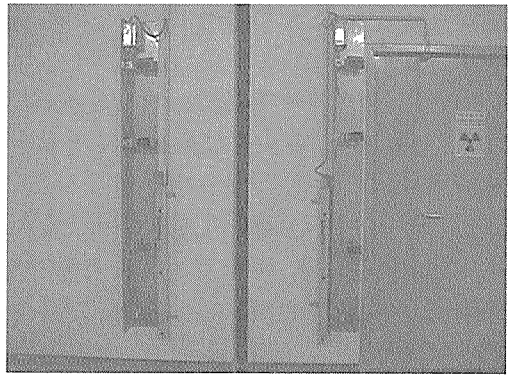
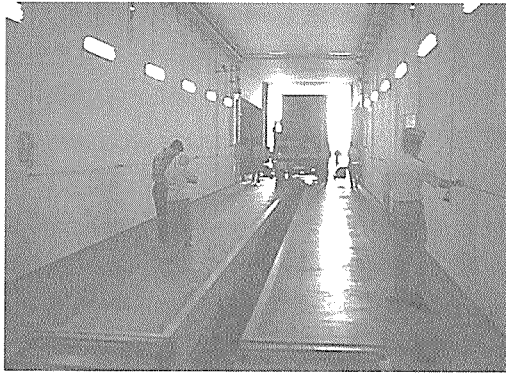
엑스선 검색기는 의료용 엑스선 디지털 촬영기와 마찬가지로 엑스선발생장치, 검출기 및 컴퓨터시스템으로 구성되어 있다. 단지 의료용과의 차이점이라고 하면 사용하는 엑스선의 에너지가 의료용(70~130 keV)에 비해 높다는 점(2~9 MeV)과 의료용 DR(digital radiography)가 2차원 어레이 검출기를 사용하기 때문에 한 번 방사선 조사로 2차원 영상을 얻는 데 비해 컨테이너 검색기는 서류 스캐너(document scanner)처럼 1차원 어레이 검출기를 사용하기 때문에 대상화물 또는 선

원/검출기 세트 중 한 가지를 이송하면서 영상을 얻는다는 점이 다르다. 이러한 차이점으로 인해 엑스선 발생장치 역시 엑스선관 대신 선형전자선가속기(linear electron accelerator)를 사용하며 검출기 역시 의료용에 사용하는 박막형 검출기(flat panel detector) 대신 단결정 섬광형 검출기(single crystal scintillation detector)를 활용하고 있다. <그림 2> 참고

선형가속기는 대부분 미국 Varian사의 Linatron 모델(크기:~1입방미터, 중량:~150 kg)을 사용하는 데 전자선 다발을 3, 6 또는 9 MeV까지 가속하여 판형 텅스텐 표적을 때리게 하고 이때 표적 후면에서 가속기 박스 외부로 발생하는 제동복사엑스선(bremsstrahlung x-ray)을 슬릿형 콜리메이터로 통과케 하여 팬빔(fan beam) 형태로 컨테이너 이송터널로 방출하는 구조를 가지고 있다. 가장 보편적인 9 MeV 사양의 경우 표적으로 1 m 거리에서 최대 30 Gy/hr의 방사선량을 갖도록 하고 있으므로 선형가속기 주변 역시 산란방사선에 의한 공간방사선량이 높기 때문에 선형가속기만을 위한 별도의 차폐실을 구성하고 있다. 따라서 엑스선 고정형 검색시설의 일반적인 구



〈그림 2〉 엑스선 발생 선형전자선가속기 및 CdWO4 선형어레이 검출기 일부



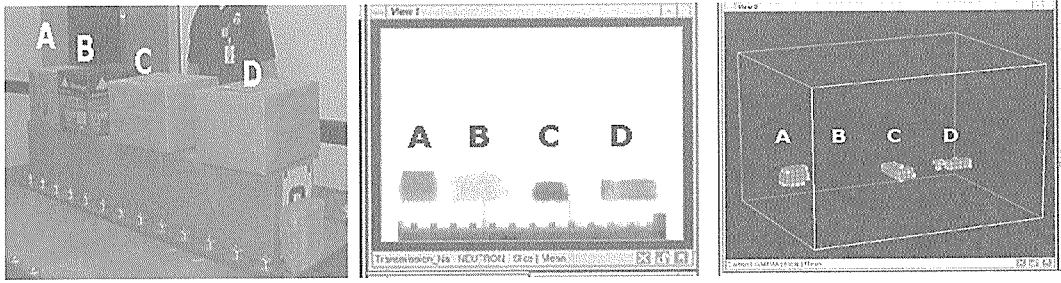
〈그림 3〉 고정형 엑스선 검색기 터널 내부 및 검출기실 차폐벽의 슬릿

조는 컨테이너 이송을 위한 터널과 터널의 중앙부분 벽너머로 엑스선발생장치 실이 있으며 반대편에 벽너머로는 기둥모양의 검색기 실이 위치한 형태이다. 세공간은 모두 방사선 차폐벽으로 둘러싸여 있으며 단지 팬빔의 방사선만이 세공간을 모두 통과하도록 해당 벽면에 슬릿형태로 틈이 나 있다.〈그림 3〉 참조) 검출기는 1000~1500 개정도의 단일 검출기가 일렬로 배열되어 있는 형태이며 단일 검출기는 주로 CdWO₄ 단결정 블록(Pitch : 4~5 mm, Width : 5~15 mm, Length : 30~50 mm)과 실리콘 광다이오드(Silicon pin photodiode)가 결합한 형태이다. 보통 컨테이너 검색기 위치에서의 방사선량은 5~10 Gy/hr 정도이나 컨테이너 이송속도가 대략 20 feet(6m)/150초이고 검출기 피치가 4 mm이므로 실제로 수화물이 엑스선을 받는 시간은 0.1 초이다. 따라서 실제 수화물이 받는 방사선량은 스캔당 140~300 uGy 이다. 만일 실수로 사람이나 동물이 검색컨테이너에 있었다고 치고 14~30 mrem으로 에너지효과를 무시하더라도 병원에서 흉부방사선 1번 받는 양 정도가 된다고 볼 수 있다. 방사선 검색기의 성능은 크게 투과력과 분해능, 그리고 검색속도로 표현할 수 있

는데, 투과력을 살펴보면 9 MeV 선형가속기가 만드는 제동복사선의 평균에너지가 3 MeV 정도로서 400 mm 두께의 철판을 투과하여 5 cm 두께의 납판을 구분할 수 있으며 분해능은 검출기의 피치가 4 mm 일 경우 0.5 mm 두께의 wire로 직경 수 cm 의 링을 식별할 수 있는 정도이다.

감마선을 이용하는 검색기는 엑스선 검색기에 비해 선형가속기 대신 Co-60나 Cs-137과 같은 동위원소를 사용하기 때문에 비용이 낮은 장점이 있으나 영상의 질이 다소 떨어진다. Cs-137은 662 keV의 감마선을 내기 때문에 투과력도 9 MeV 엑스선에 비해 다소 떨어지며, 또한 감마선 검출기로서 NaI(Tl) 섬광체에 광증배관(Photomultiplier tube)를 부착하는 형태의 검출기가 사용되므로 검출기 피치가 9 mm 정도로서 영상의 공간분해능이 2 mm 정도이다. 그리고 Cs-137의 경우는 반감기가 30년 정도로 초기 설치 후 수년 사용한 후부터는 보정을 하더라도 성능이 점차 낮아지게 된다는 단점을 가지고 있다. 대표적인 공급업체로서는 SAIC(미국)사를 들 수 있다.

엑스선 검색기나 감마선 검색기가 오직 투시 대상물질의 방사선흡수능 즉 물질의 전자밀도



〈그림 4〉 A담배, B물, C마리화나1, D마리화나2의 포장, 엑스선 영상 및 고속중성자 영상

차에 따른 정보만을 영상화하는 데 비해 중성자 검색기는 특정물질이 중성자를 흡수하였다가 방출하는 고유 감마선을 측정함으로써 물질의 성분분석이 가능하다는 독보적인 장점이 있다. 따라서 중성자를 이용하는 검색기는 주로 폭발물을 검색할 필요성에서 개발되었으며 마약류의 검색에도 효과를 내고 있다. 중성자를 이용하는 검색기는 다시 열중성자 이용기기(TNA : Thermal Neutron Analysis)와 고속중성자 이용기기(PFNA : Pulse Fast Neutron Analysis)로 나눌 수 있으며 열중성자는 Cf-252 동위원소에서 방출되는 고속중성자를 감속하여 저에너지의 열중성자로 만들어 활용하므로 발생장치가 비교적 간단하지만, 고속중성자의 경우 중수소(Deuterium)를 가속하여 중수소 표적을 때려서 나오는 고속의 펄스형 단일에너지 중성자원을 사용하기 때문에 대형의 가속기 시설이 필요하고 비용이 많이 든다. 또한 중성자 시설의 경우 중성자에 대한 차폐시설이 매우 중요하다. 열중성자의 경우 그 자체만으로는 영상을 만들기 어려우므로 엑스선 검색기와 결합하여 사용하고 있다. 예를 들어 타이페이 공항에 설치된 열중성자 시설은 3 MeV 엑스선검색기와 같이 사용하는 것으로 엑스선 검색기는 영상을 만들고 열중성자는 수화물내의 질소물질의 농도를

측정하여 높을 경우 폭발물이거나 마약일 가능성에 대한 정보를 제공하고 있다. 한편 고속중성자의 경우는 중성자펄스가 대상 컨테이너를 투과하면서 내부의 수화물과 반응하여 만들어 내는 특성 감마선을 주변에 설치한 감마선 분광검출기(spectrometer)로 측정하는 구조를 가지고 있다. 펄스형 가속기와 회전하는 중성자 조준기(rotating chopper)를 사용하기 때문에 감마선을 방출하는 시점에서의 중성자 위치를 미리 알 수 있으므로 특정 감마선들의 발생위치에 대한 3차원 맵을 제공한다. 컨테이너 내부를 3차원 격자로 구성되었다고 가정할 경우 각 격자 복셀(Voxel)내의 성분원소들이 방출하는 특정감마선의 세기 비율을 가지고 복셀을 이루는 물질을 짐작할 수 있다. 예를 들어 대부분의 폭발물질은 보통의 유기물질에 비해 산소와 질소의 탄소대비 농도가 높은 편이며, 마약의 경우 탄소의 산소대비 농도가 높다. 따라서 모든 유기물질 및 폭발물, 마약의 수소, 산소, 질소, 탄소의 농도비를 미리 컴퓨터에 저장해두고 복셀별로 측정한 값들과 비교하여 물질을 찾아 낼 수 있게 된다.〈그림 4〉 참고) 고속 중성자에 관한 원천 기술은 미국 RAPISCAN사가 개발한 것이며 현재 멕시코 국경에 인접한 미국 앨파소에 고속중성자 검색기가 세계 최초로 설치되어 운



(그림 5) 이동형 엑스선 검색기 및 이동형 감마선 검색기

영되고 있다.

또한 검색기의 설치 방식에 따라 고정형과 이동형이 있으며 고정형은 차폐건물내에 설치하는 방식이고 이동형은 검색기를 차량에 탑재하여 활용하는 방식이다.(<그림 5> 참고) 고정형의 경우, 차폐벽의 설치로 인해 검색요원과 주변 사람들의 방사선 안전을 확보하면서도 동시에 검색대상차량에 고에너지 및 고준위의 방사선량을 조사할 수 있으며, 또한 대개의 경우 검색대상차량을 레일을 이용하여 견인하기 때문에 떨림이 없어 영상의 화질이 우수하다. 반면 이동형의 경우 검색대상 차량은 정지시킨 채로 검색기 탑재 차량이 서행하면서 촬영을 하기 때문에 넓은 작업 공간이 필요하고 동시에 작업 공간의 크기에 따라 사용하는 방사선량을 제한해야 하므로 영상의 화질이 다소 떨어지는 단점이 있지만, 다른 장소로 이동하여 사용할 수 있다는 장점이 있다. 최근에는 고정형이라도 타 장소로 이동하여 설치가 가능하도록 차폐벽이나 내부 장치들을 일정한 중량이나 크기 이하로 제작한 뒤 조립식으로 설치하는 조립이동형(정확하게 표현하자면 이동가능 고정형) 장치도 사용되고 있다.

또한 좌우 방향으로의 검색 뿐만 아니라 상하 방향의 검색을 동시에 수행하는 양방향 고정형 검색기도 설치 운영되고 있다.

컨테이너 검색기의 운영에 따른 효과 및 문제점

컨테이너는 수출입 화물을 외포장 없이 용이하게 수송하므로 포장 시간 및 비용이 절감되고 열차, 자동차, 선박 등의 적하가 인력 대신 기계화되어 하역 시간 및 비용 역시 크게 절감된다. 또한 컨테이너 수송은 화물을 문에서 문까지 형태의 변경없이 신속하게 운송할 수 있으며, 도중에 화물의 파손, 분실, 도난등의 사고를 막을 수 있는 장점이 있다. 하지만 역으로 컨테이너 단위로 수입되는 화물을 검사하기 위해서는 컨테이너를 개장하여 모든 수화물을 꺼내고 또 단위 포장용기를 뜯어야 하기 때문에 반입 시간 지체는 물론 화물의 훼손까지 가는 경우가 있어 정상적인 화물의 경우 화주들의 불평요인이 되기도 한다. 이처럼 사람의 손에 의해 검사하던 방법으로는 하루 서너대 정도의 컨테이너만을 검사할 수 있었으며

그것도 여러 단계로 포장되어 있는 화물의 경우 깊숙하고 교묘하게 은닉된 밀수품을 찾아 내기란 대단히 어려운 일이었다.

보통 컨테이너 수송은 컨테이너선에 의한 해상수송과 견인트럭 또는 화차를 이용한 육상수송을 연계하여 이루어지는 데 컨테이너선이 입항하는 항만을 컨테이너 터미널이라고 하며 하역작업을 할 수 있는 시설과 넓은 야적장을 가지고 있다.

컨테이너 검색기는 컨테이너 터미널 내부에 설치하되 컨테이너 견인트럭들중에서 검사대상으로 선별된 트럭들이 터미널을 떠나기 전에 검사를 실시하기 때문에 터미널 출입문 근처에 설치하게 된다. 검색기로 검사한다고 모든 밀반입 물품을 찾아낼 수 있는 것은 아니다. 물품의 은닉상태와 검색기의 성능이 결합하여 만드는 영상의 질 그리고 검사자의 판독 시간 및 경험에 따라 검색확률이 결정된다. 높이 2.4 m 길이 6 ~ 15 m의 영상을 컴퓨터 화면에 디스플레이한 상태에서 점점 교묘하게 은닉해오는 밀수품을 찾아내기 위해서는 디지털

영상처리 기법들을 활용하고 있다. 즉 화면의 대조도(contrast)를 스캔함으로써 깊이방향의 스캔을 하기도 하며, 또 의심이 가는 부분을 소프트웨어에서 제공하는 돋보기기능을 써서 확대(zoom)하여 세밀하게 분석하기도 한다. 검색후 이상이 있다고 여겨지는 컨테이너는 다시 개장검사를 하여 확인하는 절차를 거치게 된다.

로테르담항 세관의 경우를 예를 들어 보면 2000년 일일 3건 정도로 연 1,100건을 개장검사하여 101건을 적발함으로써 개장검사당 적발율이 9.2% 이었다. 2001년 장비도입후 연 28,285건을 검사하고 이중에서 1,732건을 개장검사하여 502건을 적발하여 개장검사당 적발율이 29%로 크게 개선되었다.

우리나라도 2002년 부산항과 인천항에 대형컨테이너 검색기를 도입하여 설치한 것을 기점으로 현재 5개항에 8기가 운영중에 있으며 2기가 설치중에 있다.(〈표 1〉 참고) 현재 국내 수출입 화물의 70% 정도를 차지하는 부산항은 세계 100여 개국, 500여 항만과 교역을

〈표 1〉 대한민국 관세청 컨테이너 검색기 설치 현황

구입년도	설치장소	검색기타입	엑스선발생장치		해외공급회사	국내공급회사	현황
			제작사	최대에너지			
2002	인천	조립이동형(단방향)	Varian(미국)	9 MeV	Rapiscan(미국)	대동기재	운영중
	부산	조립이동형(단방향)	Varian(미국)	9 MeV	Rapiscan(미국)	대동기재	운영중
	부산	조립이동형(단방향)	Varian(미국)	9 MeV	Rapiscan(미국)	대동기재	운영중
	부산	차량이동형(단방향)	Nuctech(중국)	2.5 MeV	Nuctech(중국)	포스콘	운영중
2003	평택	조립이동형(단방향)	Nuctech(중국)	9 MeV	Nuctech(중국)	포스콘	운영중
	광양	조립이동형(단방향)	Nuctech(중국)	9 MeV	Nuctech(중국)	포스콘	운영중
2004	울산	조립이동형(단방향)	Varian(미국)	6 MeV	Rapiscan(미국)	대동기재	운영중
	인천	고정형(양방향)	Varian(미국)	9 MeV	BIR (미국)	포스데이타	운영중
2005	부산	고정형(양방향)	Varian(미국)	9 MeV	BIR (미국)	포스데이타	설치중
	군산	차량이동형(단방향)	Varian(미국)	3 MeV	L3 (미국)	포스데이타	설치중

하고 있으며 연간 13,000척의 타국적 선박이 기항하여 연간 5백만 TEU의 물량이 반입되고 또 비슷한 규모의 물량이 반출된다. 즉 일일평균 14,000 TEU가 반입되고 있다. 부산항의 경우 컨테이너 검색기가 도입되기 전인 2001년경에는 연 2300건 정도의 컨테이너 만이 검사되었으나 현재 4대의 컨테이너가 가동되어 있어 하루 수백대를 검사할 수 있게 되었다. 현재 가장 널리 사용되고 있는 엑스선 검색기의 경우 효율적으로 운영을 한다면 검색기 1대가 시간당 20~30 개의 컨테이너를 검색할 수도 있다. 부산항과 같이 교역량이 많은 항구의 경우 검색기를 여러대 설치하더라도 모든 컨테이너를 전량 검사하는 것이 불가능하기 때문에 검색대상화물을 선별하는 과정의 중요성은 여전히 존재하고 있다. 대상화물의 선별은 통상 통관관리과에서 화물의 종류, 원산지, 수출입업자의 전력등 여러 가지 정보를 고려하여 이루어지고 있다.

최근 들어서는 밀수선박들이 부산항을 우회하여 다른 항구를 통해 반입하거나 더욱 대담하게는 야간에 작은 선박을 이용하여 밀수품을 반입하려는 시도를 하고 있어 부산 세관도 100여대 이상의 고성능의 CCTV 감시카메라를 부산항 전역에 걸쳐 설치하고 10척의 감시정과 44대의 순찰차량 활동을 실시간으로 파악하는 등 감시정보정합시스템을 갖추어 하루 평균 15,000명의 부두출입자와 2만여대의 출

입차량을 주야로 감시하고 있다. 이러한 노력으로 부산세관의 경우 2004년 47건, 2005년 58건의 검거실적을 낸바 있다.

맺는 말

컨테이너 방사선 검색기는 날로 교묘해지고 증가해가는 밀수적발을 위해 그 필요성이 날로 증대해지고 있으며 각국의 항만 세관은 물론 공항세관도 점차 기기를 늘려가고 있다. 현재 기술로서는 고에너지 엑스선과 고정밀 검출기를 이용하는 엑스선 검색기가 가장 좋은 화질을 제공하고 있으며 일부사의 제품은 검색기 신호처리 부분을 채널별 디지털 방식으로 개선함으로써 선명한 화질을 제공하고 있다. 또한 하드웨어 못지 않게 소프트웨어의 기능도 중요한 역할을 하고 있다. 한편 911 테러 사건 이후의 폭발물 검색의 필요성이 대두되고 있어 최근 들어 중성자를 이용하는 성분 분석 기기가 시범적으로 운영되고 있어 영화에서나 가능하였던 검색기술의 현실화 하고 있다. 최근 들어 국내에서도 방사선 발생장치 및 검출기 기술이 연구 개발되고 있고 국가과제를 통하여 컨테이너 검색시스템이 개발된 바가 있어 머지 않아 국내기술로 제작한 검색기를 국내 항구는 물론 외국 항구에 설치하게 되리라 기대해 본다. **KRIA**