

방사능 폭발물의 X-ray 영상판독에 관한 연구

A Study on the X-ray Image Reading of Radiological Dispersal Device

정근우¹, 박경진^{2*}

Geun-Woo Jeong¹, Kyong-Jin Park^{2*}

〈Abstract〉

The purpose of radiological Dispersal Device(RDD) is to kill people by explosives and to cause radiation exposure by dispersing radioactive materials. And It is a form of explosive that combines radioactive materials such as Co-60 and Ir-192 with improvised explosives. In this study, we tested and evaluated whether it was possible to read the internal structure of an explosive using X-rays in a radioactive explosive situation. The improvised explosive device was manufactured using 2 lb of model TNT explosives, one practice detonator, one 9V battery, and a timer switch in a leather briefcase measuring $41 \times 35 \times 10 \text{ cm}^3$. The radioactive material used was the Co-60 source used in the low-level gamma ray irradiation device operated at the Advanced Radiation Research Institute of the Korea Atomic Energy Research Institute. The radiation dose used was gamma ray energy of 1.17 MeV and 1.33 MeV from a Co-60 source of 2208 Ci. The dose rates are divided into 0.5, 1, 2, and 4 Gy/h, and the exposure time was divided into 1, 3, 5, and 10 minutes. Co-60 source was mixed with the manufactured explosive and X-ray image reading was performed. As a result of the experiment, the X-ray image appeared black in all conditions divided by dose rate and time, and it was impossible to confirm the internal structure of the explosive. This is because γ -rays emitted from radioactive explosives have higher energy and stronger penetrating power than X-rays, so it is believed that imaging using X-rays is limited By blackening the film. The results of this study are expected

1 주저자, 부산경찰청 경찰특공대
E-mail: gnwoo777@police.go.kr

2* 교신저자, 인제대학교 응급구조학과 교수
E-mail: pkj1407@naver.com

1 Main Author, Dept. of Police Special Operation Unit, Busan Metropolitan Police

2* Corresponding Author, Dept, of Emergency Medical Service, Inje University

to be used as basic data for research and development of X-ray imaging that can read the internal structure of explosives in radioactive explosive situations.

Keywords : CBR Terrorism, Radioactive Terrorism, Radioactive Explosive, X-ray Image Reading

1. 서론

급변하는 테러 환경 속에서 사제 폭발물(improvised explosive device, IED)의 제작은 다양화되고 지능화되고 있다. 사제 폭발물은 인가되지 않고 즉흥적으로 제작된 비표준 폭발물로서 일정한 규격 없이 다양한 형태와 성능으로 제조한 폭발물을 말한다[1]. 우리나라는 테러로부터 안전한 국가로 인식되어 왔지만, 강대국과의 군사적 공조 관계 등 이유로 테러 대상국으로 지목되었다는 점에서 이제는 더 이상 폭발물 테러로부터 벗어날 수 없는 실정이다[2].

국내에서는 2011년 5월 서울 강남고속버스 터미널 1층 물품 보관함에서 폭죽용 화약과 부탄가스 등으로 제작된 사제 폭발물의 폭발이 발생하였고, 2014년 12월에는 전북 익산시 신동성당에서 주최한 콘서트에서 인화성 물질이 들어있는 냄비 투척으로 인한 폭발이 발생하였으며, 2017년 6월에는 연세대학교 1 공학관 교수연구실 문고리에 걸려있던 쇼핑백에서 나사와 화약, 건전지, 뇌관 등으로 구성된 텀블러 사제 폭발물이 연소하는 사건이 발생하였다[3].

폭발물 처리에서 가장 중요한 요소는 X-ray 영상판독이다. 사제 폭발물의 X-ray 영상판독은 X선을 이용하여 폭발물을 투과한 후 얻어진 데이터를 영상으로 구현하여 내부구조를 판단하는 방식이다[4]. X-ray 촬영은 X선을 사용하여 물체 내부의 구조를 보여주는 방법으로 물체를 투과한 X선이 감쇠되는 정도에 따라 이미지를 생성한다.

X-ray 영상은 물체를 이루는 구성 요소별로 물체를 통과하는 정도가 다른 점을 이용하여 영상을 만들며 일상에서 관측하고자 하는 대상의 외부가 아닌 내부에 투과된 영상을 볼 수 있다. 그렇기 때문에 물체의 구성 요소별로 X-ray의 투과율에 따라 영상이 달라지는 등 여러 환경적인 요인에 의하여 영상의 질이 달라진다. 따라서 X-ray 영상판독은 폭발물처리 과정에서 가장 중요한 부분이기 때문에 영상판독이 제대로 이루어지지 않으면 사제 폭발물의 내부구조를 파악하기 어렵고 최종적으로는 처리하는데 제약이 따른다.

한편 방사능 폭발물(radiological dispersal device, RDD)은 방사능 확산장치를 가리키는 말로 일반적인 사제 폭발물에 방사성 물질을 혼합한 형태의 폭발물이다[5]. 방사능 폭발물은 일차적인 폭발로 인한 직접적인 파괴로 인명 살상뿐 아니라 이차적으로 방사성 물질의 분산으로 인하여 광범위한 지역에 오염을 일으켜 방사선 피폭을 일으킬 수 있다. 테러범들은 사제 폭발물 제작에 관하여 전문적인 지식을 가지고 있어 어렵지 않게 제작이 가능하다. 또한 테러범들은 건축이나 선박의 내부 결합 및 용접 부위의 이상 유무를 확인하기 위해 시행하는 비파괴 검사에서 사용하는 산업용 선원인 Co-60과 Ir-192 등은 어렵지 않게 취득할 수 있어 사제 폭발물에 결합하여 방사능 폭발물 테러로 이용할 수 있는 가능성이 매우 높다.

특히 방사능 폭발물에서 방출되는 감마선은 X선보다 에너지가 높고 투과력이 매우 강하다. 방사능 폭발물 현장에서는 고에너지의 감마선으로

인하여 폭발물의 X-ray 촬영과 판독을 진행하는데 어려움이 많다. 특히 방사선의 특성상 기존의 폭발물 판독 방법으로는 내부구조를 파악하는데 어려움이 있으며 내부구조가 일부 판독된다고 하더라도 영상의 질이 매우 떨어져 폭발물의 구성요소들을 추정하기에는 제한점이 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 방사능 폭발물 상황을 구현하여 X-ray 영상 촬영을 통한 내부구조 판독 실험을 진행하였다.

2. 대상 및 방법

2.1 실험 개요

본 실험은 사제 폭발물에 방사성 물질이 혼합된 방사능 폭발물 상황에서 X선을 이용한 내부구조 판독이 가능한지를 검증해 보고자 하였다. 모형 사제 폭발물을 제작하고 Co-60 방사성 물질을 이용하여 방사능 폭발물을 구현하였다. 방사선량과 노출시간별로 방사능폭발물의 X-ray 영상촬영을 진행하여 내부구조를 판독하였다.

2.2 사제 폭발물 제작

방사능 폭발물의 X-ray 영상판독 실험을 위하여 사제 폭발물을 제작하였다. 사제 폭발물은 $41 \times 35 \times 10 \text{cm}^3$ 의 가죽으로 된 서류 가방, 모형 TNT 폭약 2lb, 연습용 뇌관 1개, 9V 배터리 1개, 타이머 식 스위치를 사용하여 제작하였다. 사제 폭발물은 X선 촬영을 하였을 경우 폭약(Explosive), 뇌관(Detonator), 전원(Power), 스위치(Switch), 용기(Case) 등의 구성요소가 명확하게 판독될 수 있도록 제작하였다[6].

2.3 방사성 물질

방사성 물질은 한국원자력연구원 첨단 방사선연구소에서 운용중인 저준위 감마선 조사 장치 IR-222 Dry Storage Irradiator(MDS Nordion, Canada)에 사용되는 Co-60 선원을 이용하였다[7]. 감마선이 균등하게 조사될 수 있도록 $42 \times 36 \text{cm}^2$ 의 영상 필름을 직경 2m, 높이 0.38m의 조사 시료대에 올려놓고 선원과의 거리 각각 204.02cm, 142.04cm, 98.89cm, 68.84cm 되는 지점에 배열하여 Fig. 1과 같이 방사능 폭발물의 감마선 노출 상황을 구현하였다. Co-60 방사성 물질의 방사능 세기는 2208Ci 이고, 방출되는 감마선 에너지는 1.17MeV, 1.33MeV의 조건에서 실험을 진행하였다[8].



Fig. 1 IR-222 Dry Storage Irradiator

2.4 방사선량과 노출시간

방사선량은 폭발물처리 요원이 방사능 폭발물 가까이에서 노출될 수 있는 선량으로 시간당 0.5Gy, 1Gy, 2Gy, 4Gy로 나누어 설정하였다. 노출시간은 폭발물처리 요원이 폭발물의 X-ray 촬영을 수행하는 데 소요될 수 있는 시간을 고려하여 1min, 3min, 5min, 10min으로 나누어 설정하였다. 정확한 방사선량을 조사하기 위하여 E-Scan Alanine

Dosimeter(Bruker, Germany)를 이용하여 선량을 검·교정 하였다. 위 조건에서 방사능 폭발물 상황을 구현하여 X선 영상 촬영 및 내부구조 판독을 진행하였다.

2.5 X-ray 영상판독

X-ray 영상판독은 이동식 X선 발생장치, 영상 필름, 필름 현상기, 제어컴퓨터로 구성되어 있는 장비인 Scan-X를 사용하여 진행하였다. 이동식 X선 발생장치는 XRS-3를 사용하였고 일반적으로 서류 가방을 촬영하기위해 설정되는 선량인 Pulse 5로 조정하여 선량을 일정하게 유지하였다. 필름과 선원과의 거리(film focus distance, FFD)는 Fig. 2와 같이 150cm로 일정하게 설정하였다. 사제 폭발물의 정중앙을 향하여 X선 촬영을 진행한 후 영상을 현상하여 내부구조를 판독하였다.



Fig. 2 FFD 150 cm

3. 결과

필름현상 분석 결과는 Table 1과 같이 방사선량과 노출 시간별로 설정한 모든 조건에서 X-ray 영상이 검게 구현되어 폭발물의 내부구조 확인이 불가능하였다.

일반적인 사제 폭발물을 Pulse 5로 방사선의 세기를 설정하여 X선 촬영을 진행하였을 때는 Fig. 3과 같이 폭약, 뇌관, 전원, 스위치 등 폭발물의 내부구조 영상이 명확하게 구현되어 판독이

Table 1. Experimental group

Group	0.5 Gy/h	1 Gy/h	2 Gy/h	4 Gy/h
1 min	X	X	X	X
3 min	X	X	X	X
5 min	X	X	X	X
10 min	X	X	X	X

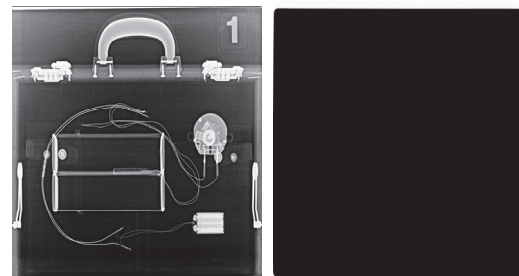


Fig. 3 Result of Pulse 5



Fig. 4 Result of dose 0.5 Gy, time 1 min and Pulse 5

가능하였으나 방사선량 0.5 Gy/h와 노출시간 1 min에서 방사성 물질에 노출된 후 동일한 Pulse 조건으로 X선 촬영을 진행하였을 경우 영상이 검게 나타나 내부구조가 구현되지 않아 판독할 수 없는 결과가 나타났다.

또한 방사선량 0.5Gy/h와 노출시간 1min에서 판독된 영상과 방사선량 4Gy/h와 노출시간 10min에서 판독한 영상을 비교한 결과, Fig. 4와 같이 두 영상 간에는 비교가 불가능할 정도로 검게 흑화된 정도가 비슷하게 나타났다.

4. 논 의

본 연구에서는 사제 폭발물에 방사성 물질이 혼합된 방사능 폭발물 상황에서 X선을 이용한 영상을 구현하여 폭발물 내부구조 판독이 가능한지를 실험하고 평가하였다. 사제 폭발물은 $41 \times 35 \times 10 \text{ cm}^3$ 의 가죽으로 된 서류 가방에 모형 TNT 폭약 2lb, 연습용 뇌관 1개, 9V 배터리 1개, 타이머 스위치를 사용하여 제작하였고 방사성 물질은 한국원자력연구원 첨단 방사선연구소에서 운용 중인 저준위 감마선 조사 장치 IR-222 Dry Storage Irradiator (MDS Nordion, Canada)에 사용되는 Co-60 선원을 이용하였다. 실험 조건은 2208 Ci의 Co-60 선원 1.17MeV, 1.33MeV의 감마선 에너지를 이용하여 0.5, 1, 2, 4Gy/h의 선량률과 1, 3, 5, 10min의 노출시간으로 나누어 설정하였다. 제작된 사제 폭발물은 방사성 물질을 혼합하여 X-ray 영상 촬영 및 판독을 진행하였다. 실험에 사용된 방사성 물질은 방사능 폭발물 상황을 구현하기 위하여 Co-60 선원을 사용하였는데, 실제 방사능 폭발물 상황을 묘사하였다는 점에서 실험적인 의의가 있는 것으로 평가된다. 다만 방사선 노출로 인한 위험을 고려하여 사제 폭발물

내부에 Co-60 방사성 물질을 넣은 형태가 아닌 사제 폭발물 옆에 Co-60 방사성 물질을 배치하는 방법으로 방사능 폭발물 형태를 구현하였다는 점에서는 한계가 있다.

방사선량과 노출시간은 방사능 폭발물이 발견되었을 때 폭발물처리 요원이 노출될 수 있는 선량과 폭발물의 X선 촬영에 소요되는 시간을 고려하여 설정하였다. 최저 선량인 0.5Gy/h와 최저 노출시간인 1min에서 판독된 영상과 최고 선량인 4Gy/h와 최고 노출시간인 10min 에서 판독된 영상은 두 영상 간에 차이를 발견할 수 없을 정도로 모두 흑화된 결과가 나타났다. 따라서 후속 연구로 더 적은 선량 조건에서 X-ray 영상판독이 가능한 기준을 탐색하고 연구해 볼 필요성을 가진다.

X선 영상판독 결과에서는 방사선량과 노출 시간별로 설정한 모든 조건에서 X-ray 영상이 검게 구현되어 폭발물의 내부구조 확인이 불가능하였다. 이는 방사능 폭발물에서 방출되는 γ 선은 에너지가 높고 투과력이 강하여 필름을 흑화시킴으로써 X선을 이용한 영상판독이 제한된 것으로 판단된다. X선과 γ 선은 전자파 모두 방사선으로 방사선 투과검사에서 사용하고 있으며 X선은 고전압 전자관에서 인공적으로 발생하여 에너지의 세기와 방사선량이 전압과 전류에 의해 결정되는 반면, γ 선은 방사성물질에서 핵의 붕괴로 발생하는 방사선으로 세기와 방사선량이 방사성동위원소의 종류에 따라 결정된다[9]. X선과 γ 선은 모두 투과성이 있고 필름을 감광시키는 특성을 가진 전자파 방사선으로 상대적으로 에너지 세기가 큰 γ 선이 X선보다 더 강하게 필름을 감광시킴으로써 X선을 이용한 영상 구현이 되지 않은 것으로 판단된다. 따라서 방사능 폭발물 상황에서 완벽한 폭발물 처리를 위하여 X선을 이용한 내부구조를 판독할 수 있는 연구가 필요하다.

X-ray 영상판독 과정에서 사용하는 영상판(image

plate, IP)에는 광자극 발광(photostimulated luminescence, PSL) 현상이 나타나는 형광체를 사용한다. 광자극 발광이란 X선, γ 선, 전자선, 자외선 등 방사선에 의해서 형광체를 여기 하여 발광시킨 후 발광 파장보다 장파장의 에너지를 조사하여 형광체에 에너지가 축적되는 현상으로, 광자극 발광 형광체를 이용한 영상판은 감도가 우수하고 넓은 동적영역을 가지며 디지털화된 영상을 얻을 수 있어 폭넓게 활용되고 있다[10].

영상필름의 구조는 보호층, 형광체층, 지지체층 등으로 이루어져 구성되는데 영상 형성에 결정적인 영향을 주는 것은 형광체층이다. 형광체층은 $BaF_x:Eu^{2+}$ 라는 고분자 무기화합물의 미립자가 경합제로 분산되어 지지체 상에 고밀도로 충전 도포된 것이다[11]. X선이 조사되면 X선 에너지를 저장하였다가 다시 그 물질에 가시광선을 조사하면 물질 속에 저장되었던 X선 에너지와 비례하는 빛을 발한다. 그 빛을 scan 하여 영상을 획득한다.

실험에서 사용한 영상 필름에 도포된 형광체는 방사능 폭발물에서 방출되는 고에너지의 γ 선과 영상판독을 위해 사용되는 저에너지의 X선에 모두 발광하여 열형광 특성을 나타낸 것으로 판단된다. 따라서 방사능 폭발물 내부구조 판독을 위해 γ 선에는 열형광 특성을 나타내지 않고 X선에만 열형광 특성을 나타내는 저에너지 영역의 형광체 개발을 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다[12].

5. 결론

방사능 폭발물은 일반적인 사제 폭발물에 방사성 물질을 혼합한 형태의 폭발물로서 일차적인 폭발로 인한 직접적인 파괴로 인명 살상뿐 아니라 이차적으로 방사성 물질의 분산으로 인하여 광범위한 지역에 오염을 일으켜 방사선 피폭을 일으킬 수 있다.

본 연구에서는 방사능 폭발물 상황에서 X선을 이용한 폭발물 내부구조 판독이 가능한지를 실험하고 평가하였다. Co-60 방사성 물질로 방사능 폭발물 상황을 구현하여 일정한 세기와 시간 동안 방사선에 노출한 후 X-ray 판독을 진행하였다.

실험 결과, 최저조건인 선량 0.5Gy/h, 노출시간 1min에서 X-ray 영상이 검게 나타나 폭발물의 내부구조 확인이 불가능하였다. 본 연구의 결과는 방사능 폭발물 상황에서 폭발물의 내부구조를 판독할 수 있는 저에너지 열형광 특성 형광체 연구 등 X선 영상구현 연구 및 개발을 위한 기초적인 연구 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 김희수, 이주영, “사제폭발물 제조가능 화학물질 수입통관 관리방안 연구”, 관세학회지, Vol. 18, No. 1, (2017).
- [2] 전병한, 김현섭, “도쿄 지하철 사린가스 테러 사례분석을 통한 국내의 화학테러 예방·대응 개선방안”, 한국테러학회, Vol. 14, No. 1, pp. 33-49, (2021).
- [3] 박주진, 정성배, 이영석, “사례분석을 통한 다중이용시설 폭발물 테러 대응방안”, 한국국가안보국민안전학회, Vol. 16, pp. 87-111, (2023).
- [4] 정진만, 정연완, 조용훈, 오세진, “폭발물의 구조이해가 X-ray 판독능력에 미치는 영향 연구”, 한국재난정보학회 학술발표대회, pp. 301-301, (2017).
- [5] 차장현, 김대수, 송현준, “방사능테러 위협 및 예상 시나리오: Dirty Bomb과 IND를 중심으로”, 국방과 기술, pp. 128-137, (2017).
- [6] 이강영·백성욱, “급조폭발물 (IED)의 이해와 대응방안”, 국방과 기술, pp. 46-57, (2010).
- [7] 정근우, “경찰특공대 요원의 방사선방호 방안 마련을 위한 감마선노출 현주의 장해영향 연구”, 치안정책연구, Vol. 37, No. 1, pp. 211-236, (2023).

- [8] 정근우, 정도영, 김창주, 이지은, 정상현, 김희진, 민병인, “감마선에 조사된 암컷 흰쥐의 생식기관에 대한 흰점박이꽃무지 유충 추출물의 방사선 방호효과”, 한국방사선학회, Vol. 15, No. 2, pp. 247-255, (2021).
- [9] 박상기, 안연식, 길두송, “보일러튜브 용접부에 대한 방사선 선원의 최적화 연구”, 대한용접접합학회지, Vol. 28, No. 4, pp. 363-367, (2010).
- [10] 김성환, 김선철, “염화알칼리토금속 화합물에 도핑된 EU2+ 이온의 광발광 및 광자극발광특성”, 방사선기술과학, Vol. 29, No. 3, pp. 141-145, (2006).
- [11] 조남수, 이동영, “Computed Radiograp의 기본이론”, 대한디지털의료영상학회, Vol. 3, No. 1, pp. 138-152, (1997).
- [12] 김영국, “ K_2SO_4 열형광체의 저에너지 X-선에 따른 열형광 특성에 관한 연구”, 경남대학교 환경문제연구지, Vol. 26, pp. 79-87, (2003).

(접수: 2024.03.14. 수정: 2024.04.01. 게재확장: 2024.04.09.)