



# 열화 우라늄탄 문제와 열화 우라늄의 특성

신 장 수

한국원자력연구소 원자력기술통제센터 책임연구원

**열** 화(劣化) 우라늄탄이라 함은 탄환의 관통 능력을 높이기 위하여 탄두에 열화 우라늄 금속을 사용한 것을 말하며, 열화 우라늄은 일명 감손(減損) 우라늄이라고도 하고 영어로는 Depleted Uranium(DU)이라 한다.

지난 1999년 3월 24일 NATO군에 의한 유고 내 코소보 지역 폭격이 시작되었고, 이 폭격에 열화 우라늄탄이 사용되었다는 사실이 밝혀지면서 당시 이 전쟁에 참여한 NATO군 군인들 및 폭격 대상 지역 주민들 사이에 평소와 달리 백혈병·신장병·만성 두통·기형아·사산 등의 질병들이 발병하고 있다는 소식이 전해지면서 국제적으로 인체 및 자연에 대한 DU의 피해 여부를 규명해야 한다는 ‘발칸 신드롬’ 여론이 비등하게 되었다.

실제로 1994-1995년에 보스니

아-헤르체고비나 내전 당시 보스니아에서 1만발 이상, 1999년 코소보에서 3만발 이상의 열화 우라늄탄이 사용된 것으로 보도되었다[1].

DU가 실제로 인체에 어느 정도의 피해를 주는지에 대한 과학적인 증거는 아직 없으나 여기에 참전한 이탈리아 병사 6명이 이미 백혈병으로 사망하였고 30여명이 불면증 등을 호소하고 있으며, 벨기에 5명, 포르투갈 1명, 체코 1명 등이 사망하였고, 프랑스와 네덜란드 침전 군인들 중에도 수 명이 백혈병 치료를 받고 있다고 전해지고 있으니 DU의 인체 영향에 대해 심도있는 연구가 필요한 상황임에는 틀림없는 것으로 보인다.

1999년에 개최된 제 20차 UNEP(United Nations Environment Programme, 케냐의 나이로비 소재) 회의에서 코소보에서의 자연 파괴 상황 파악을 결의하였고,

1999년 5월 BTF(Balkans Task Force)라는 전문가 조직을 구성하여 전쟁으로 인한 제반의 피해 조사를 시작하면서 열화 우라늄탄에 의한 피해도 조사 대상에 포함하고 있다.

BTF는 2000년 11월 유고 현지의 11곳을 방문하였고 이 중 8곳에서 열화 우라늄탄 사용 흔적을 발견하였다. 또한 현지에서 총 340개의 시료를 채취하였는데, 여기에는 물·토양·식물체·파괴 차량 내의 먼지 swipe·탄두의 파편 시료 등이 포함되어 있고, 현재 영국·스위스·스웨덴·이탈리아 및 IAEA 등 유럽 내 5개 기관에서 분석중에 있다. UNEP는 2001년 3월까지 종합 보고서를 발간할 예정이다[2].

그러나 열화 우라늄탄을 가장 많이 사용하고 있는 미국은 DU의 인체 피해를 인정하고 있지 않은 상황이며, 이에 대하여 유럽연합은 열화

우라늄탄 사용 중지를 촉구하는 등 미국과 유럽연합간에 갈등 조짐도 나타나고 있는 실정이다. 따라서 DU가 환경 및 인체에 미치는 영향을 논할 수 있는 구체적 자료는 아직 없으나 알려진 특성들을 종합해 보고자 한다.

〈표〉 DU에서의 우라늄 동위원소 및 주요 딸핵종들의 물리적 특성

특성	U-238	U-235	U-234	Th-234	Th-231	Pa-234
반감기(년)	4.5x10 <sup>9</sup>	7.1x10 <sup>8</sup>	2.5x10 <sup>5</sup>	24.1d	25.5h	6.7h
함량(%)	99.8	0.2	0.001	trace	trace	trace
비방사능 Bq/mg DU	12.27	0.16	2.29	12.27	12.27	0.16
비중 : 19.07    녹는점 : 1,132℃    총 비방사능 : 39.42						

**DU의 물리/화학적 특성[3]**

천연 상태에서 우라늄은 U-238 · U-235 · U-234의 3가지 동위원소가 있으며, 특별히 우라늄광이 아니더라도 자연에 널리 분포하고 있고 (지표: 0.5-10ppm(5-125Bq/kg), 담수: 0.1-8μg/l(1-90mBq/l), 지하수: <1-140mBq/l, 해수: 40.5mBq/l(3.3μg/l)), 구성비는 U-238 98.28%, U-235 0.72%, U-234 0.0056%이다.

이 동위원소들 중에서 U-235가 열중성자 흡수에 의한 핵분열 특성을 가지므로 원자력발전소나 또는 우라늄 원자탄에서는 U-235의 농도를 천연 우라늄에서의 농도(0.72%)보다 높여 사용하고 있으며, 이와 같이 U-235의 농도를 높이는 과정을 농축(enrichment)이라 한다.

우라늄 원자탄의 경우 U-235의 함량이 90% 이상이고, 경수형 원자력발전소 핵연료의 경우 약 3.5%로 농축된 우라늄을 사용하고 있다.

U-235를 농축하는 데는 기체 확

산법 · 기체 원심 분리법 등 여러 가지 방법이 사용되며, 이 농축 과정에서 U-235가 열화되어 폐기물로 나오는 우라늄이 DU이다. DU에서의 U-235 함량은 약 0.2% 정도로 천연 상태의 1/3 수준으로 감소하게 된다.

기본적으로 DU이건 천연 우라늄이건 간에 화학적인 특성은 동일하며, 다만 DU는 천연 우라늄에 비해 방사능이 약 60% 수준인 것으로 알려져 있다.[4]

최근 코소보 사태에 사용된 것으로 알려진 열화 우라늄탄에서는 약간의 U-236이 발견되었다고 보도된 바 있는데, U-236의 경우 천연에는 존재하지 않으므로 사용된 DU가 사용후 핵연료의 재처리로부터 유입된 우라늄일 수도 있다고 추측하고 있다.

그러나 UNEP에서 분석을 의뢰한 한 실험실에서의 측정 결과 U-236은 0.0028% 정도로 나타났으며, 이는 DU의 전체 방사능에 견주어 볼 때 영향을 줄 수 있는 수준은 못되는 것으로 판단하고 있다[5].

〈표〉는 DU에서의 우라늄 동위원소 및 주요 딸핵종들의 물리적 특성을 나타내고 있다.

전술한 바와 같이 DU는 화학적으로 천연 우라늄과 차이가 없다. 자연 상태에서 +2 · +3 · +4 · +6 등의 다양한 원자가를 가지지만 주로 +6가 형태가 많다. 일반적으로는 산소와 결합하여 UO<sub>2</sub><sup>+</sup>(uranyl) 이온의 상태로 존재한다. 동위원소들은 화학적으로는 차이가 없기 때문에 특별히 DU의 특성을 논하기는 어렵다.

금속 DU는 천연 우라늄 금속과 마찬가지로 반응성이 크다. 금속 우라늄은 매우 좋은 환원제로 알려져 있다.

실온의 공기 중에서 금속 우라늄의 산화는 천천히 진행되며, 산화가 진행되면서 표면에는 얇은 피막이 형성되고 3~4주 지나면 완전히 산화되어 검은색을 띠게 된다. 형성된 산화 피막은 내부 산화를 막지는 못하는 것으로 알려져 있다.

수소가 존재할 때는 hydride를 만들게 되므로 반응이 더 용이하게



진행된다. 금속 우라늄은 끓는 물에도 강하고 산에도 비교적 강하나 6N의 진한 HCl에서는 반응이 매우 빠르다.

Uranyl chloride · uranyl nitrate · uranyl ethanoate 등은 물에 잘 녹으나  $UO_2 \cdot UO_3 \cdot U_3O_8$  등은 잘 녹지 않는다.

분말 형태의 금속 우라늄은 자연 발화가 될 정도로 반응이 격렬하다. 이와 같이 격렬한 반응은 온도를 높이게 되며, 우라늄 반응 생성물도  $UO_2 \cdot UO_3$  · 외에  $U_3O_8$ 을 생성하는 등 매우 복잡하게 진행되는 것으로 알려져 있다.

**활용 현황[4]**

**1. 산업적 활용**

DU는 U-235의 농축 부산물로 볼 수 있다. 따라서 경수로 핵연료 제조를 위한 우라늄 농축 공장이나 핵무기 제조를 위한 군사용 농축 공장에서 매우 값싸게 대량으로 생산되고 있다.

우라늄의 인체 또는 자연 환경에의 영향이 정확히 밝혀지지 않은 상황에서 이 값싼 재료는 매우 비중이 크고 녹는 점이 높다는 이유로 군사적 목적 이외의 일반 산업에서도 널리 활용되고 있다. 다음은 DU가 활용되고 있는 산업 분야이다.

- 비행기의 평형(counterweights)이나 무게 중심(ballast) 조절용



**30mm x 173 PGU-14 API (Armour Piercing Incendiary)**

Aluminium Case

DU Penetrator

Tracer

Propellant Charge

Electric Primer

〈그림〉 미국 A-10 전투기의 열화 우라늄탄 구조

- 경주용 보트의 균형 유지용
- 병원에서 사용하는 Co-60의 감마선이나 X-ray의 차폐용
- 방사선 물질 운반 용기 : Pb보다 차폐력 우수  
(비중 U: 19.07, Pu: 11.35)[6]

**2. 군사적 활용(7)**

우라늄은 〈표〉에서 보는 바와 같이 비중이 크고, 녹는 점이 매우 높으므로 군사 목적에도 유용하게 활용되고 있다.

코스보 사태에서 미국의 A-10 Warthog tankbuster 전투기가 열화 우라늄탄을 사용한 것으로 보도되었으며, 그밖에도 영국 · 프랑스도 DU가 장착된 무기를 보유하고 있는 것으로 보아 영국의

Harrier 및 프랑스 전투기들도 열화 우라늄탄을 사용한 것으로 추측되고 있다.

보통 하나의 목표물에 대해 A-10기는 3대가 공격을 하며, 분당 3,900 rounds의 탄환을 발사할 수 있다고 한다. 발사되는 모든 탄환이 열화 우라늄탄은 아니고 이 중 5번째 또는 6번째 탄환이 열화 우라늄탄이다. 대개 1회 공격시 1대의 비행기에서 50~100 rounds가 발사되며, 이중에는 10~20개의 열화 우라늄탄이 포함되어 있다.

열화 우라늄 탄환 1개에는 292g의 DU가 포함되어 있으므로 비행기 1대당 3~6kg의 DU를 사용하며, 이를 3대 전체에 대해 환산하면 1개 목표 지점에 9~18kg의 DU를

사용하게 되는 것이다.

이 탄환이 목표물에 맞으면 10~35%가 5 $\mu$ m 이하의 연무(煙霧)로 되며, 이 정도의 크기는 폐 내부까지 흡입 침적될 수 있으므로 이를 흡입하게 되면 건강상 치명적인 결과를 초래할 수 있다.

〈그림〉에서 보는 바와 같이 탱크 공격용 열화 우라늄탄은 길이 173mm, 직경 30mm이고, 탄두에는 밀면 직경 16mm 길이 95mm의 DU 금속이 있으며 알루미늄으로 싸여 있다. DU가 군사용으로 활용되는 곳은 다음과 같다.

- 탱크 장갑용 판
- 철제 장갑 관통용 탄환
- 크루즈 미사일의 평형 유지용

**인체에 미치는 영향**

우라늄은 자연에도 폭넓게 존재하기 때문에 인간은 여러 경로를 통해 우라늄을 흡입 또는 섭취하지 않을 수는 없으며, 따라서 가능한한 체내 유입을 최소화하여야 할 수밖에 없다.

참고로 세계보건기구(WHO)의 1998년 자료에 의하면, 음용수의 경우 2 $\mu$ g-U/litre의 농도를 권고치로 하고 있으며, 하루 섭취량도 0.6 $\mu$ g-U/kg-body로 권고하고 있다.[3]

특별히 DU가 인체에 어떠한 영향을 미치는지가 밝혀진 것은 없다.

그러나 화학적 특성은 천연 우라늄과 동일하다고 볼 수 있고, 방사능의 경우는 천연 우라늄의 60% 수준이기 때문에 천연 우라늄의 인체내 특성을 파악하면 DU의 특성도 추정할 수 있다고 보여 진다.

DU도 인체 외부로부터의 방사선학적 영향을 미칠 수 있는데, 이 때는 DU를 함유하고 있는 군사 무기를 직접 취급하거나 그 근처에서 근무하는 경우이며, 또한 열화 우라늄탄이 목표물에 충돌하여 생긴 DU 분말 또는 파편을 직접 접하게 되는 경우가 있다.

한편 이 DU는 호흡·섭취 또는 피부 부상 부위 등을 통해 인체 내부로 침투할 수 있으며, 이 때는 방사선학적 뿐만 아니라 화학적 영향도 고려하여야 한다.

DU는 주로  $\alpha$ -선 붕괴를 하므로 방사선의 투과력은 매우 약해서 체외 피폭에 대해서는 크게 염려할 필요가 없다. 그러나 체내에서는 매우 에너지가 큰  $\alpha$ -선이 인체 조직에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 체내에서의 DU 영향이 중요하다.

체내로 들어온 DU는 95% 이상이 흡수되지 않고 체외로 방출된다. 혈액에 들어온 경우도 약 67%가 신장에서 걸러져서 24시간 내에 소변으로 체외 배출된다. 체내에 남은 DU는 신장을 위주로 뼈·간 등에 분포하며 생물학적 반감기는 180~360일 정도이다.

폐에 들어온 분말 형태의 DU 중 크기가 5 $\mu$ m 정도로 작은 것들은 폐에 침적하고 잘 녹지도 않으므로 오랜 기간 동안 폐에 머물러  $\alpha$ - 및  $\beta$ -선에 의한 피해를 줄 수 있고, 이는 폐암의 원인이 될 수도 있다.

DU에의 노출이 백혈병을 야기하는지에 대해 밝혀진 바는 없다. 그러나 일본의 히로시마·나가사키에서의 예로 보아 이온을 발생시킬 수 있는 만큼의 에너지를 가진 방사선들( $\gamma$ -선, neutron)은 암을 유발하는 데 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있으므로 DU에의 노출이 백혈병 발생에 전혀 무관하다고 하기는 아직 자료가 미흡한 실정이다.

**안전 조치상의 특성**

IAEA에서는 DU의 경우 20톤을 1 Significant Quantity(SQ)라 하여 핵폭발 장치 1개를 제조할 수 있는 양으로 규정하고 있다.

천연 우라늄의 경우 1SQ가 10톤이고, 저농축 우라늄(U-235 20% 이하)의 경우는 75kg으로 규정[8]하고 있는 것에 비추어 농축이라는 과정이 얼마나 어려운 과정인지를 알 수 있다.

DU는 Fast Breeder Reactor (FBR)에서 분열성 핵물질인 Pu-239를 생성시키기 위해 사용되나 FBR 자체의 개발이 활발하지 못하여 DU의 사용도 거의 없는 실정이



다. 다만 DU를 중성자 조사시키면 Pu-239가 많이 생성되므로 핵무기 제조에 적합한 고순도의 Pu를 생산할 수 있다.

그러나 U-238의 중성자 흡수 단면적이 U-235의 1/200 수준(중성자 에너지에 따라 다름)[9]이어서 DU를 사용하여 핵물질 안전 조치상 우려할만하게 질 좋은 Pu를 생산하기는 어려운 일이다.

**결 언**

DU는 코소보 사태에서 사용한 열화 우라늄탄 문제가 최근 대두되면서 일반인들의 주목을 받게 되었다. 기본적으로 DU는 화학적으로는 천연 우라늄과 동일한 것이며, 다만 방사능이 천연 우라늄의 60% 수준이므로 방사선학적인 영향에 있어서 약간의 차이를 보일 수 있다.

특히 열화 우라늄탄은 좁은 목표물 지역에 집중하여 투척되었을 것이므로 이 한정된 지역에서는 DU의 영향이 심각하게 나타날 수도 있다고 생각해야 할 것이다.

일단 열화 우라늄탄의 투척이 알려진 지역에서는 토양 등 자연 환경에서의 오염 제거가 중요하다고 생각되지만, 강수 또는 다른 영향에 의해 지하수 등 수질 오염이 발생하였다면 오염의 확산 방지를 위해 전쟁에서 소모한 비용 못지 않은 많은



DU는 코소보 사태에서 사용한 열화 우라늄탄 문제가 최근 대두되면서 일반인들의 주목을 받게 되었다. 기본적으로 DU는 화학적으로는 천연 우라늄과 동일한 것이며, 다만 방사능이 천연 우라늄의 60% 수준이므로 방사선학적인 영향에 있어서 약간의 차이를 보일 수 있다.

비용이 추가로 소요될 것이므로 그 물질적/경제적 피해의 심각성을 가늠하기란 매우 어려운 일이다.

**[참고 자료]**

[1] 동아일보, Jan. 5, 2001.  
 [2] IAEA Press Release, "Depleted Uranium", PR 2001/01, Jan. 11, 2001.  
 [3] UNEP/UNCHS Balkan Task Force(BTF), "The Potential Effects on Human Health and the Environment Arising from Possible Use of Depleted Uranium during the 1999 Kosovo Conflict", A Preliminary Assessment,

Appendix 4, Oct. 1999.  
 [4] WHO Fact Sheets No. 257, Jan. 2001.  
 [5] UNEP Media Release, Geneva, Jan. 16, 2001.  
 [6] "Handbook of Chemistry and Physics", Vol. 60, CRC Press Inc., B-13, 1979.  
 [7] Appendix 5 of [3].  
 [8] G. Moussalli, "Safeguards: Its Verification Technologies and Related Experience", Annex: Material Type(significant Quantity), IAEA Technical Workshop, May 12, 1997.  
 [9] B-310 of [6]