

개인 방사선량 측정기의 개발 및 활용 계획

장시영

한국원자력연구소 방사선안전관리실장



개인 방사선량 측정기

선량계) LiF:Mg, Cu, Na, Si를 개발하여 특허 출원하였다.

한국원자력연구소에서 개발한 열형광 선량계는 열형광 물질 LiF에 새로운 첨가물인 나트륨(Na)과 실리콘(Si) 등을 활성화제로 혼합하여 제조하였기 때문에 외국에서 상용화한 기존의 열형광 선량계 보다 방사선 측정 감도가 2배 이상 향상시킨 것이 특징이다.

원자력 연구 개발 및 원자력 발전과 같은 원자력의 평화적 이용이나 방사선과 방사성 동위원소의 산업 및 의료적 이용 과정에서 불가피하게 발생되는 방사선으로 인한 개인 및 공중의 피폭 방사선량을 정확하게 측정하는 것은 개인 및 공중의 방사선 안전 및 재해 방지를 위하여 법적·제도적으로 요구되는 필수 요건의 하나이다.

한 국원자력연구소(방사선안전관리실)는 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 계획 사업의 지원을 받아 열형광 물질에 방사선을 쬐인 후 열을 가하면 쬐인 방사선의 양에 비례하여 형광이 방출되는 원리를 이용하여 사람이나 기타 물체가 피폭한 방사선의 양을 정확하게 측정, 평가할 수 있는 개인 방사선량 측정용 열형광 선량계(TLD, Thermo-Luminescence Dosimeter, 열형광 선량계 또는 TL

이 열형광 선량계는 개인 피폭 방사선의 종류, 에너지의 세기, 조사 방향에 관계없이 방사선의 양을 정확하게 측정할 수 있어 작업자나 환자의 피폭 선량 뿐만 아니라 일반 환경 중의 공간 방사선량도 측정할 수 있다.

이제 국내에서 외국산 보다 성능이 우수한 열형광 선량계가 개발됨에 따라 앞으로 이의 실용화가 이루어질 경우 상당한 수입 대체 효과는 물론 동남아시아 지역 등에 수출도 가능할 것으로 전망된다.

개인 방사선량 측정·평가의 기본적인 요구 사항은 인체에 입사하는 방사선의 종류, 에너지 및 입사 방향에 관계없이 성능 기준 요건으로 정해진 정확도 내에서 국제방사선단위측정위원회(ICRU)가 정의한 개인 선량량을 정확하게 측정하고 평가할 수 있어야 한다는 것이다.

이를 위해서는 외부 입사 방사선을 정확하게 측정할 수 있는 개인 방사

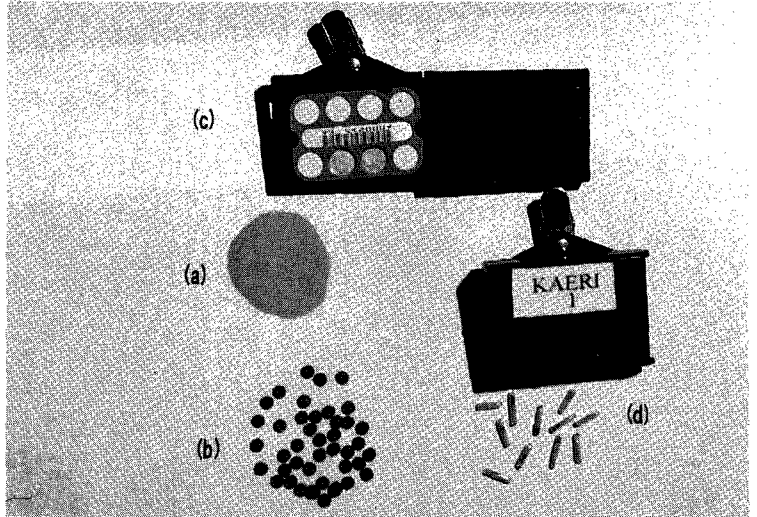
선량 측정기(개인 선량계)가 필요하다.

현재 전세계적으로 사용되는 개인 선량계로는 필름 배지 선량계, 열형광 (Thermo-Luminescence Dosimeter, TLD)선량계, 포켓 선량계, 전자식 선량계, 그리고 최근에 개발된 광자극 형광 (Optically Stimulated Luminescence, OSL)선량계 등 여러 종류가 있다.

이들 중에서 필름 배지 선량계, 열형광 선량계는 일정 기간 동안 개인의 누적 피폭 방사선량(개인 선량)을 공식적으로 측정·기록 및 확인하기 위한 법정 개인 선량계로 활용되며, 투과성 광자에만 반응하는 포켓 선량계 및 전자식 선량계는 보통 출입 통제 및 방사선 작업 현장에서의 직접적인 피폭 확인을 위한 보조 선량계로 활용된다.

필름 배지는 개인 선량 측정용으로 현재까지도 널리 사용되고 있으나, LiF , CaSO_4 , $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, MgB_4O_7 , CaF_2 등의 다양한 열형광 선량계가 개발된 후 개인 선량을 정확하고 편리하게 측정할 수 있는 열형광 선량계의 사용이 전세계적으로 급증하고 있는 추세이며, 국내에서도 개인 방사선량 측정 기관의 약 80% 이상이 열형광 선량계를 사용하여 개인 선량을 측정하고 있다.

현재 국내에서는 78년에 상업 활동을 시작한 원자력발전소 외에도 방사성 동위원소나 방사선을 이용하는 산업체의 수가 꾸준히 증가하여 왔



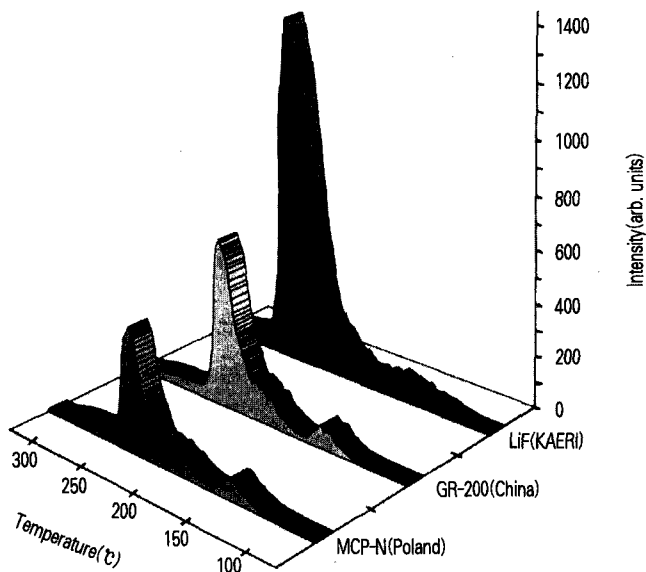
한국원자력연구소 개발 LiF:Mg,Cu,Na,Si 분말(a), 디스크형 펠릿(b) 및 암치료 선량 측정용 선량계(d), (c)는 열형광 선량계 배지 시스템(외산).

〈표 1〉 한국원자력연구소 개발 열형광 선량계 LiF:Mg,Cu,Na,Si 및 해외 상용 열형광 선량계 LiF:Mg,Cu,P 의 특성 비교

특 성	KAERI 개발 LiF:Mg,Cu,Na,Si	GR-200(상용) LiF:Mg,Cu,P	비 고
열형광 감도			GR-200과 상대 비교 (그림 2) 참조
· 피크 높이	1.8	1.0	
· 면 적	2.0	1.0	
주 피크 온도($^{\circ}\text{C}$) (at 5°C s^{-1})	220	213	
광자 에너지 상대 감도	1.39	1.06	
관독 선량 범위	$2.8 \mu\text{Sv} \sim 60 \text{Sv}$	$2.0 \mu\text{Sv} \sim 12 \text{Sv}$	
배취 균질성	2.3	2.5	
잠상 퇴행도(%/월)			
· 실 온	2	3	
· 70°C	18	33	

으며(대략 1,300여 업체), 방사선 작업 종사자의 수도 약 3만명 정도에 이르고 있으나(의료 관계 기관 종사자를 포함하면 40,000명 정도), 이들의 개인 선량 측정을 위한 개인 선량

계는 전량 외국으로부터 수입에 의존하는 실정, 관련 기술 및 장비 해외 의존에서 탈피하기 위한 개인 선량계 및 관련 시스템의 국산화 개발이 요구되고 있었다.



〈그림 1〉 한국원자력연구소 개발 LiF:Mg,Cu,Na,Si 및 해외 상용 LiF:Mg,Cu,P의 열형광 감도 비교

열형광 선량계의 개발

열형광 선량계는 LiF, CaSO₄와 같은 열형광 물질에 방사선이 입사된 후 형광 물질을 가열할 때 발생하는 열형광(thermo-luminescence, TL)의 양이 흡수된 방사선량에 비례하는 성질을 이용하여 방사선량을 측정하는 선량계이다.

보통 열형광 물질은 내부의 형광 중심부에 하나 이상의 활성제(activator)를 함유한 결정체로 구성되어 있다.

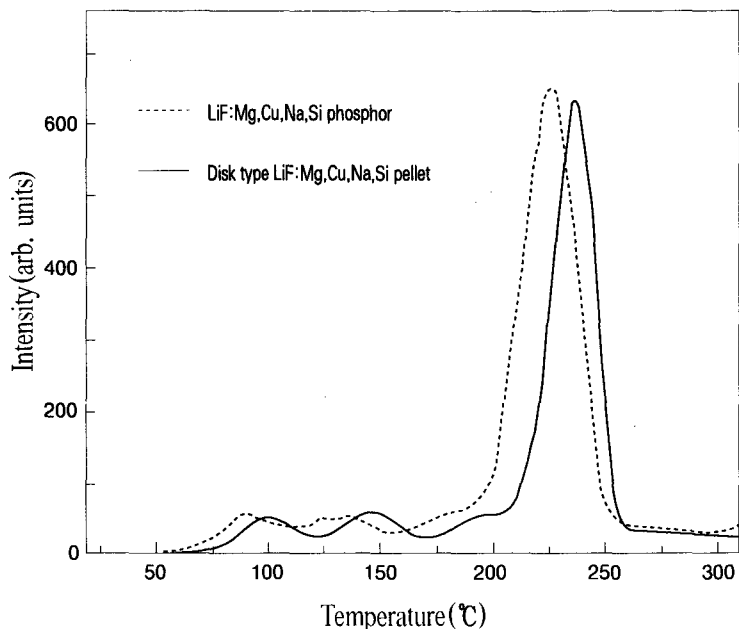
활성제는 형광체의 중심부나 결정 격자의 결함인 덫(trap)으로 작용하며 활성제의 함유량은 형광 물질에 따라 수ppm에서 수%에 이르기까지 한다.

활성제의 양과 종류에 따라 열형광 방출량 및 열형광 glow 곡선의 모양, 열형광 감도, 주 피크의 온도 및 감쇠율 특성 등이 달라진다.

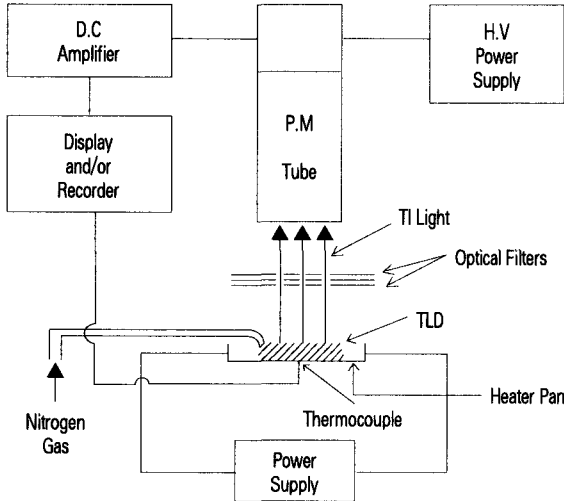
가열 온도에 따라 열형광 물질에서 방출되는 열형광량 및 강도의 변화를 광증 배관(PM tube)으로 측정하여 나타낸 곡선을 열형광 glow 곡선이라 한다.

따라서 이 열형광 glow 곡선을 해석하면 열형광 물질에 흡수된 방사선량과 에너지에 대한 정보를 얻을 수 있으며 이로부터 방사선량을 측정할 수 있다.

한국원자력연구소에서 '개인 방사선량 평가 기술의 자립 및 선진화'를



〈그림 2〉 LiF:Mg,Cu,Na,Si 분말과 디스크형 pellet의 열형광 glow 곡선



(그림 3) 열형광 선량계 판독 장치 개념도

열형광 선량계의 교정, 판독 및 개인선량 측정

개인 선량계를 이용하여 개인 선량을 측정하기 위해서는 개인 선량계의 교정이 필요하다.

개인 선량계의 교정이라 함은, 개인 선량계를 인체 모사 모형인 팬텀 표면에 부착시켜(작업자의 개인 선량계 패용을 모사) 일정한 기준 방사선량으로 조사시킨 후 개인 선량계의 판독치로부터 ICRU가 정의한 개인 선량 당량을 산정하고 평가하는 물리적 과정 및 절차를 의미한다.

이 교정 절차에 의해 개인 선량계의 특성 자료가 얻어지며, 이를 기초로 설계된 개인 선량 평가 알고리즘을 이용하면 개인 선량계 판독치로부터 개인 선량 당량을 평가할 수 있다.

열형광 선량계를 이용하여 개인 선량을 평가하기 위해서는 열형광 선량계 판독 장치(TLD Reader System)가 필요하다.

이 판독 장치는 열형광 물질을 상온에서 가열기(heater)속에 넣은 뒤 온도를 증가시키에 따라 방출되는 열형광을 광증 배관(Photo-Multiplier tube, PM tube)으로 측정하는 장치로서, (그림 3)에 열형광의 측정 원리를 개략적으로 나타내었다.

열형광 선량계 판독 장치에 기본적으로 요구되는 사항은 열형광 물질 가열기, 열형광 측정 광증 배관 및 열형광 계수 장치이며, 이외에 부수적

목표로 과학기술부가 지원하는 원자력 연구 개발 중장기 계획 사업의 지원을 받아 개발하여 특허 출원한 새로운 열형광 선량계 LiF:Mg,Cu,Na,Si(사진 참조)는 유효 원자 번호(Z_{eff})가 8.14로 공기(7.64)나 인체 조직(7.42)과 유사한 조직 등과 물질이면서 외국에서 이미 상용화하여 사용하고 있는 LiF:Mg,Cu,P 보다 열형광 감도가 2배 이상 향상된 새로운 선량계이다.

입자의 크기와 형태(분말·펠렛·칩 등)로 소자화가 가능하여 매우 작은 국소 영역의 선량을 측정할 수 있으며, 수 μ Sv에서 수 Sv의 넓은 선량 범위 내에서 선량 측정이 가능하고 γ 선이나 X-선 뿐만 아니라 β 선과 중성자에 대한 감도가 높아 다양한 종류의 방사선을 측정할 수 있다.

또한 필름 배치 선량계와는 달리

적절한 열처리시 반복 사용이 가능하며 잠상 퇴행이 매우 낮아(<3%/월) 장기간에 걸친 개인의 피폭 선량을 정확히 측정할 수 있다.

따라서 개인 선량의 측정은 물론, 환경 방사선량 측정과 환자의 진단 및 치료시의 흡수 선량 측정에도 널리 사용될 수 있으며, 원자력 시설의 비상시 환경 방사선 측정에도 활용될 수 있다.

(표)는 한국원자력연구소에서 개발한 열형광 선량계 LiF:Mg,Cu,Na,Si와 외국에서 사용화한 기존의 열형광 선량계 LiF:Mg,Cu,P 사이의 특성 비교 자료를, (그림 1)은 열형광 감도 특성의 비교 결과를 보여주며, (그림 2)는 LiF:Mg,Cu,Na,Si 분말과 디스크형 펠렛의 열형광 glow 곡선을 보여준다.

으로 열형광 측정 자료인 개인 선량계 판독치로부터 선량을 계산할 수 있는 개인 선량 평가 알고리즘이 S/W로 필요하다.

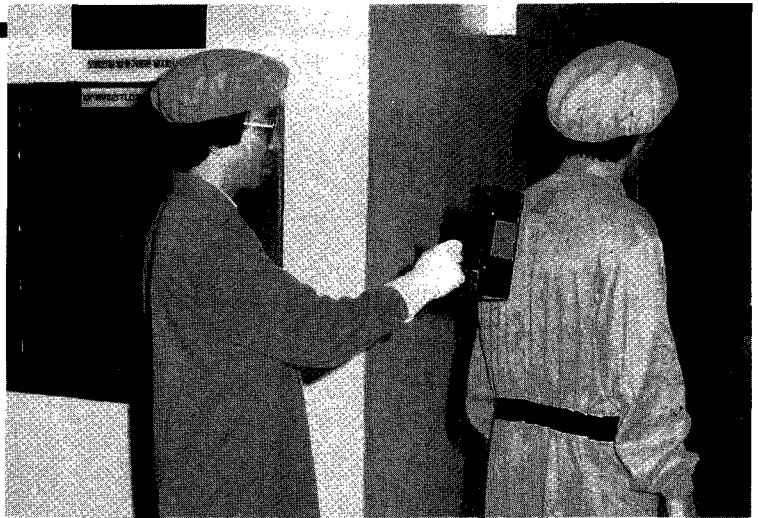
개인 선량 평가 알고리즘은 ICRU에서 개인 방사선 모니터링 목적으로 제안한 방사선 방호 실용량인 개인 선량 당량을 개인 선량계 판독치로부터 평가하기 위하여 사용되는 S/W 프로그램으로, 개인 선량계의 교정 및 특성 자료를 기초로 설계·작성되므로 열형광 선량계의 종류, 배지 시스템 및 판독 장치에 따라 달라진다.

개인 선량 평가 알고리즘을 이용하면 여러 필터 영역으로 구분된 개인 선량계 배지 시스템의 각 필터 영역에서 조사 선량의 단위를 갖는 열형광 판독치에 에너지 의존성 선량 당량 환산 계수를 곱한 것이 인체의 피부(0.07mm), 수정체(0.3mm) 및 심부(10mm) 깊이에서의 개인 선량 당량 $H_p(0.07)$, $H_p(0.3)$ 및 $H_p(10)$ 로 환산, 평가된다.

개발 선량계의 향후 이용 계획 및 전망

한국원자력연구소에서 개발한 열형광 선량계 LiF:Mg,Cu,Na,Si는 전술된 바 같이 방사선 측정 특성과 성능이 외국의 제품보다 월등히 뛰어나 주목받고 있으며 일부 국가로부터 공동 연구가 제안되기도 하였다.

한국원자력연구소에서는 2000년 3월까지 수행되는 1단계 연구 기간



개인 방사선량 측정. 한국원자력연구소에서 개발한 열형광 선량계는 열형광 물질 LiF에 새로운 첨가물인 나트륨(Na)과 실리콘(Si) 등을 활성제로 혼합하여 제조하였기 때문에 외국에서 상용화한 기존의 열형광 선량계 보다 방사선 측정 감도가 2배 이상 향상시킨 것이 특징이다.

동안 LiF:Mg,Cu,Na,Si 선량계의 모든 특성을 완전히 해석하는 한편, 선량계 배지 시스템을 설계·제작하고 선량 평가 알고리즘을 개발하여 방사선 방호 현장에서 적용 가능한 개인 선량계로 활용하기 위한 연구를 계속 수행할 예정이며(한국원자력연구소에서는 LiF:Mg,Cu,Na,Si의 개발 외에도 성능과 감도가 향상된 새로운 CaSO₄ 계열 열형광 선량계도 개발중이다), 열형광 선량계 판독 장치까지도 국산화 연구를 수행할 계획이다.

이러한 연구 개발이 성공적으로 수행될 경우 현재까지 전량 외국에서 수입하여 사용하고 있는 열형광 선량계와 판독 장치까지도 국산화됨으로써 국내 개인 방사선 도시메트리 S/W 및 H/W 기술의 완전 자립이 가능해지는 것은 물론, 관련 기술 및 장비의 동남아 시장 수출도 가능할 것으로 판단된다.

따라서 한국원자력연구소에서 개

발한 열형광 선량계의 실용화와 앞으로 수행될 선량계 배지 시스템 및 판독 시스템의 공동 개발과 산업화에 관심있는 산업계의 참여와 협력이 요청된다.

방사선 분야의 국가 교정 검사 기관이며 방사선 도시메트리 분야의 국가 출연 연구 기관인 한국원자력연구소는 원자력 연구 개발 중장기 사업의 지원으로 세계 수준의 방사선 교정 기준 방사선장(X선장, γ 선장, 베타선장, 중성자선장) 및 방사선 교정 시설을 확보하여 방사선 계측기 및 개인 선량계의 정밀 교정에 의한 방사선 및 방사선량 측정의 품질과 신뢰성을 향상시켰으며, 열형광 선량계에 의한 개인 선량 평가 알고리즘을 개발하고 전파하여 국내 개인 방사선 도시메트리 기술을 가일층 제고시킨 바 있다. 앞으로도 한국원자력연구소는 국가 및 산업체에서 필요한 방사선 방호 하부 기술 및 체계의 구축과 완성을 적극 지원할 것이다.