

베타, 감마 및 X선 외부피폭 감시를 위한 개인선량계 시스템의 선택



이 재 기

한양대학교 원자력공학과 교수

방사선작업종사자의 피폭의 대부분은 베타, 감마 및 X선에 의한 것이며 종사자 개인의 피폭선량을 측정, 감시하는 것은 방사선 방호설계 및 프로그램의 성취를 확인한다는 관점에서 중요하다. 따라서 개인피폭선량측정의 신뢰성 보장을 위해 제도적 요건이 마련되어 있고 이를 만족할 수 있는 선량계시스템도 다수가 있다. 방사선방호 프로그램을 수립하는 입장에서 여러 선량계시스템중 어느 것을 선택할 것인가를 판단해야 하는데 이에 대한 접근 방향과 그 근거에 대하여 논의하였다.

1. 서 론

개인피폭감시는 방사선 방호설계와 운영의 방호 프로그램이 합리적인가를 확인하는 분명한 수단이며 작업자의 방사선 위험에 대한 정량적인 정보를 제공하는 방사선 방호의 핵심 분야의 하나이다. 개인피폭감시는 선량계를 이용한 개인외부피폭 측정을 비롯하여 작업환경감시 및 방사성핵종의 체내 섭취로 인한 내부피폭감시까지 포함한다. 이 중에서 선량계에 의한 개인피폭선량의 측정과 평가는 모든 원자력시설에서 이루어지고 있는 필수적인 방사선 관리활동이라 할 수 있다.

일반적인 작업종사자들이 피폭하는 방사선량의 95% 이상은 베타, 감마 및 X선에 의한 것이다. 중성자나 중하전입자는 상대적 위험도 즉, 선질계수가 높은 값을 가졌지만 특수한 경우가 아니면 이들 방사선에 노출

되는 경우가 없으므로 개인선량계의 주된 목표는 베타, 감마 및 X선에 의한 선량을 적절히 측정하는 것이다. 따라서 여기서는 이들 방사선을 위한 선량계에 대하여만 논의한다. 중성자나 중하전입자 선량계에 대해서는 별도의 자료들을 참고할 수 있다.

개인 외부피폭선량 측정에 사용되고 있는 선량계도는 (1) 필름배지, (2) 열형광선량계(TLD), (3) 전자선량계, (4) 포켓도시미터(또는 포켓 체임버), (5) 유리형광선량계, (6) 개인경보선량계 및 (7) 고체비적선량계 등이 있다. 고체비적 선량계는 중성자나 중하전입자의 선량 측정 목적으로만 사용되므로 베타, 감마 및 X선 선량계에 국한된 본 논의에서는 제외한다. 전자선량계는 개인경보선량계의 개량형에 가까워 구분에 문제가 있기는 하나 경보선량계의 주목적은 경보발생에 있는 반면 전자선량계는 개인선량계로서의 기능이 강화되고 자동화되었으며 저에

너지 X선 및 베타측정성을 높인 것이므로 별개로 구분하였다. 어떤 방사선시설의 운영자가 방사선방호 프로그램을 수립할 때에는 위와 같은 다양한 개인선량계 중에서 어느 것을 선택할 것인가를 놓고 판단해야 한다. 이들 선량계들은 측정원리도 다르고 특성도 다르며 측정치의 신뢰도, 유지 비용, 안정성 등에서 각기 장단점을 가지고 있으므로 이들과 관련한 종합적인 정보를 바탕으로 판단하고 선택해야 한다. 이 글은 이러한 판단의 방법과 그 근거에 대하여 도움을 주려는 목적으로 쓴 것이다. 각 선량계의 동작원리나 동작특성에 대해서 여기서 설명할 수 없으므로 필요하면 다른 자료나 문헌을 참고하기를 바란다.

2. 베타, 감마, X선용 개인선량계의 선택에서 고려할 사항

2.1 측정의 목적

먼저 선량계로 측정하는 목적에 대한 이해가 필요하다. 개인선량계를 이용한 측정의 목적은 다음과 같이 대별된다.

- (1) 개인의 집적선량을 측정함(기본기능)
- (2) 특정 작업이나 작업기간에 대한 단기간의 피폭상황을 파악함(보조기능)
- (3) 사고로 인한 대량 피폭시 그 선량값을 판단함(비상기능)
- (4) 고선량을 작업환경에서 과피폭을 예방함(경보기능)

첫째 목적인 집적선량의 측정은 개인선량계를 사용하는 기본목적이며 선량계가 갖추어야 할 최소한의 기능이므로 앞서 열거한 모든 선량계는 기본적으로 이 기능을 갖는 것으로 간주할 수 있다.

단기간의 피폭상황 파악은 방사선 관리의 성과 분석과 ALARA계획 수립 및 추진에 중요한 자료로서 특정 작업, 또는 특정작업자 그룹, 특정작업기간의 피폭 통계를 분석함으로써 방사선 관리의 문제점과 개선책 도출이 가능케 하여 준다. 이러한 단기간의 피폭 측정을 위해서는 선량계의 판독이 용이하여

필요시마다 수시로 그 때의 피폭량을 읽을 수 있는 것이어야 한다. 필름배지는 이러한 기능면에서는 매우 취약하다. TLD나 유리형 광선량계의 경우 최신 장비는 비교적 짧은 시간내에 읽음은 가능하나 불편성을 부정할 수는 없다. 이 보조기능을 가장 잘 충족하는 것은 포켓선량계와 전자선량계, 개인경보선량계이다.

사고시 피폭은 매우 높은 선량(예를들면 수십 Gy까지) 범위의 측정이 가능해야 한다. 이 기능면에서는 TLD와 유리선량계가 우수하며 필름, 전자선량계, 포켓선량계 및 경보선량계는 측정선량의 상한이 비교적 낮다.

일정하게 사전 설정된 선량 또는 선량률에 이르면 경보를 내어 작업자의 과피폭을 예방하는 기능은 그 설계상 개인 경보 선량계와 전자선량계에만 가능하다. 포켓도시미터는 작업자의 현장확인이 가능하나 능동적 경보기능은 없다.

표 1에 선량계별로 측정목적 충족성을 종합 정리하였다.

표 1. 선량계별측정 목적 충족성

선량계	측 정 목 적			
	기본 기능*	보조 기능	비상 기능	경보 기능
필름배지(FB)	○	×	△	×
TLD(TL)	○	△	◎	×
전자선량계(ED)	○	◎	△	◎
포켓도시미터(PD)	○	◎	△	△
유리형 광선량계 (GF)	○	△	◎	×
개인경보선량계 (PA)	○	◎	△	◎

* 기본기능을 충족하는 정도는 선량측정요건항목에서 검토함

2.2 측정 방사선

여기서 고려하는 방사선은 베타, 감마 및 X선에 한정하며 상기 여섯종류의 선량계는 원칙적으로 이들 방사선에 대해 감응하는 것이지만 그 에너지에 따라 감응의 정도에

차이가 있는 경우도 있다.

따라서 당해 사용시설에서 작업자들이 노출되는 방사선의 성질에 따라 가장 적합한 선량계를 선택하는 것이 필요하다.

필름의 경우 그림 1에서 보인 것과 같이 X선의 에너지가 30keV이하인 경우에는 적당히 측정하지 못한다. 또 30keV~수백keV까지의 범위에서는 감응의 에너지 의존도가 커서 여러 필터의 도움을 받더라도 측정 오차가 크다. 이러한 단점은 베타 입자에 대해서도 유사하다. 특히 30keV이하의 베타는 빛에 의한 감광을 방지하거나 감도의 증가를 위한 필름의 고유 포장재에 의해 심하게 흡수되므로 이의 측정은 거의 불가능하다.

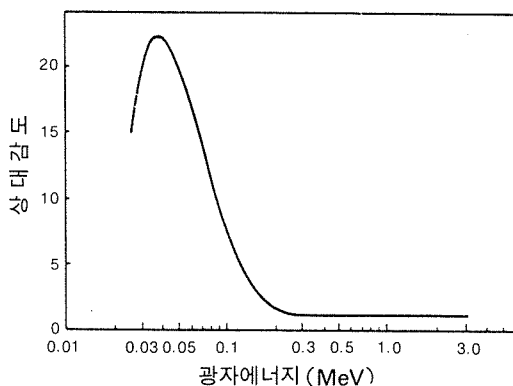


그림 1. 상이한 방사선에너지에 따른 필름의 감응

TLD의 에너지 의존성은 그림 2에서 보는 것과 같이 TL물질에 따라 상당한 차이가 있다. 가장 널리 사용되는 LiF의 경우 수십 keV까지 상대감응도가 큰 변화가 없으며 BeO(Na)의 감응은 아주 우수하다. TLD에 대해서도 필름배지와 마찬가지로 적절한 필터를 병용하면 에너지 의존특성을 크게 향상시킬 수 있다. 결론적으로 TLD는 수십 keV부터 수십MeV영역에서 무난히 사용할 수 있다.

전자선량계는 검출기로 소형보상형GM관 또는 Si반도체를 사용하는데 어느 것이나

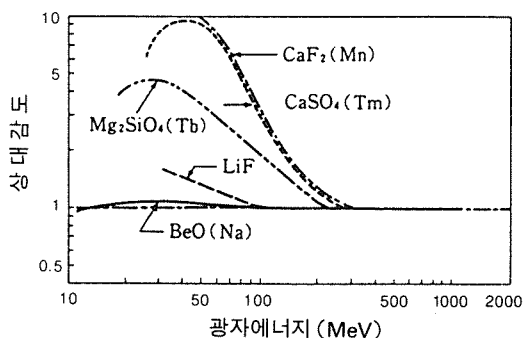


그림 2. TLD감응의 에너지 의존성

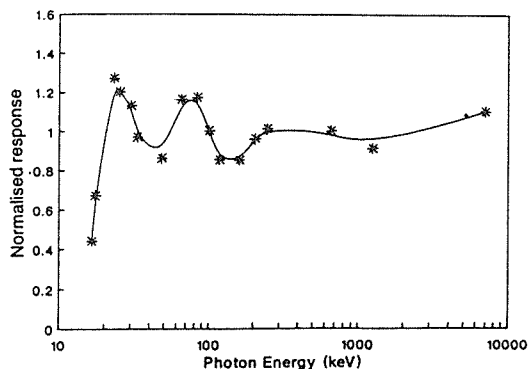


그림 3. 전형적 전자선량계의 에너지 의존성

동작특성은 유사하다. 전자선량계의 에너지 의존성은 그림 3과 같이 수십내지 수백 keV까지는 다소 불안하나 용인가능한 범위에 있고 MeV영역에서는 비교적 안정된 반응을 보인다.

포켓선량계는 전리함이므로 300keV이상의 감마나 X선에 대한 감응은 특히 우수하다. 그러나 기계적 강도의 요구로 극히 약한 재료를 사용할 수 없어 300keV이하의 X선에 대한 감마용 포켓선량계의 감도는 급속히 저하된다. 연질 X선을 전문으로 취급하는 작업장에서는 X선용으로 특별히 제작된 포켓선량계를 사용해야 한다.

유리형광선량계도 수십keV부터 MeV까지 무난히 측정가능하나 보급이 보편화되어 있지 않은 약점이 있다. 개인정보선량계는 개발목적이 피폭선량의 정확한 측정보다 경보

의 제공이 있으므로 공식선량계로 인정되기는 어려우며 보조선량계로서의 기능에 비중을 두고 있다. 대체로 경보선량계는 저에너지 X선이나 베타선의 측정에는 적절하지 않게 설계되어 있다. 그러나 유효에너지 80 keV이상의 X선이나 감마선의 선량은 무난히 측정가능하다.

각 선량계의 방사선질에 따른 적용성을 표 2에 요약하였다.

표 2. 방사선질에 대한 선량계의 적용성

방사선	에너지	선 량 계					
		FB	TL	ED	PD	GF	PA
γ(X)선	0~30keV	△	○	×	×	△	×
	30~300keV	◎	◎	◎	○	◎	○
	0.3~3MeV	◎	◎	◎	◎	◎	○
	3MeV<	○	○	○	△	○	○
β선	0~30keV	×	○	×	×	△	×
	30~1000keV	△	◎	○	×	◎	×
	1~3MeV	○	◎	◎	×	◎	×
	3MeV<	△	○	○	△	○	△
β-γ혼재	-	○	○	○	×	○	×

2.3 선량측정 특성

각 선량계가 방사선량을 측정함에 있어서 나타내는 감응특성도 선량계 선택을 위한 판단근거로 참고가 되어야 한다. 이러한 특성으로는 최저측정한계, 측정가능범위, 반응의 통계적 요동, 온도 등 환경인자의 영향, 선량을 반응, 시간경과에 따른 기록의 퇴행(fading), 방향의존성, 재사용성 등이 된다. 표 3에 이들 특성을 요약하여 보였다.

필름배지는 최저측정치가 비교적 높아 약 0.1mSv 정도이므로 측정한계 이하 값의 처리에 약간의 문제점이 있다. 통계적 요동은 절차에 따라 차이가 있으나 대개 ±20% 범위로 보며 습도의 영향을 상당히 받는다. 방습포장된 필름이 일반적인 처리주기인 30일 기간동안 보이는 잠상퇴행은 5%정도이나 실내 상대습도가 60%정도에 이르면 퇴행도가 20%를 상회하는 약점이 있다. 측정선량의 상한은 γ선은 40mSv정도, X선은 0.6Sv정도로 비교적 측정범위가 좁다. 방향성은 필름의 형태 특성상 입사방향에 따라 상당한 차이가 있다.

표 3. 개인선량계의 선량측정 특성

특 성	선 량 계					
	필름배지	열형광선량계	전자선량계	포켓선량계	유리형광선량계	개인경보선량계
측정범위						
하한(μSv)	100	1	1	30	10	10
상한(Sv)	0.6	1,000	10	0.05	100	0.1
통계적요동	±20%	저선량 ±20% 고선량 ±10%	방향성 포함 ±30%	±30%	±10%	±30%
선량에 따른 선형성	다소나쁨	좋음(±5%)	좋음	-	좋음	-
에너지의존성	비교적 큼	작음	작음	수백keV이하에서는 큼	작음	작음
기록의 퇴행(fading)	5%/30일	5%/90일	-	- (자연누설에 유의)	작음	-

TLD는 측정범위가 매우 넓어 TL물질의 선택에 따라 $1\mu\text{Sv}$ 에서 수천Sv까지 측정가능하며 통상의 상용 배지도 $10\mu\text{Sv}$ 내지 수십 Sv까지 측정가능하다. 통계적 요동은 0.1mSv 정도에서는 $\pm 20\%$, 고선량에서는 $\pm 10\%$ 정도로 비교적 우수하다. 실용온도에서 온도에 의한 변동은 5%이내로 안정되어 있고 선량 준위에 따른 감응의 직선성도 5%이내로 양호하다. 저선량률과 고선량률에서 거의 일정하게 반응하고 감응의 퇴행을 TL물질의 선택과 글로우커브의 이용피크에 따라 차이가 있으나 3개월간 5%정도로 볼 수 있다. 사용한 TLD를 열처리하여 재사용할 경우 재현성은 $\pm 5\%$ 정도로 충분히 안정되어 있다.

전자선량계는 $1\mu\text{Sv}$ 에서 10Sv까지 측정가능하며 통계적 요동은 $\pm 10\%$, 방향의존성은 $\pm 50\%$ 로서 에너지, 방향성, 통계적요동을 종합하여 $\pm 30\%$ 의 성능을 보이는 것으로 설명되고 있다. 전자식 기록의 축적이므로 일반적인 전자기기의 성능이 유지되는 환경이면 퇴행의 우려는 없으나 강력한 자기장이나 전기장에 의해 오작동될 우려를 배제할 수는 없다.

유리형광선량계는 대체로 TLD와 유사한 성능을 가진 것으로 볼 수 있다. 특징이라면 TLD는 읽는 과정에서 열을 가하면 선량계에 내장된 기록 즉, 트랩된 전자가 천이하여 피폭기록이 소멸되지만 유리선량계는 방사선 피폭으로 생긴 유리의 격자결함을 변화하지 않고 읽을 때 조사한 자외선에 의해 형광을 내는 것이므로 피폭기록이 계속하여 누적되는 것이다. 따라서 언제든지 다시 읽음이 가능하나 선량계 배포시 기록이 착오 없이 유지되어야 하는 부담이 있다. 또 측정하한이 TLD보다 높은 $10\mu\text{Sv}$ 선이다.

포켓도시미터는 읽음의 오차를 고려하면 최저측정한계는 수십 μSv 정도이며 저선량용은 $0\sim 2\text{mSv}$, 고선량용은 $0\sim 50\text{mSv}$ 정도의 측정범위를 갖는다. 미세한 전리함의 구성에 따르는 오차가 있어서 측정치의 정확도는 MeV의 감마선에 대해 $\pm 10\%$ 정도의 오차가 있다. 그러나 수백 keV이하의 X선 영역에서

에너지의존성이 크기 때문에 에너지 스펙트럼의 저하가 많은 실제 피폭 방사선장에서의 정확도는 $\pm 30\%$ 까지 이를 수 있다.

원통형인 특성상 반경방향으로의 방향특성은 $\pm 3\%$ 로 거의 균일하다. 충전된 고전압의 자연방전(누전)으로 8시간당 1% 정도의 누설이 발생하므로 $0\sim 2\text{mSv}$ 포켓 선량계에서는 8시간에 $20\mu\text{Sv}$ 까지 자연증가가 관측될 수 있다. 따라서 포켓 선량계는 정기적으로 그 누설률을 확인하여 부당하게 높은 누설을 보이는 것은 폐기해야 한다.

개인경보선량계는 기본목적이 선량의 정확한 측정이 아니므로 측정선량의 정확도는 낮아서 $\pm 30\%$ 정도로 본다. 측정범위는 $10\mu\text{Sv}\sim 100\text{mSv}$ 가 보통이며 매 사용시마다 재설정하여 사용한다.

이상에서 살펴본 선량계의 선량측정 성능만으로 평가한다면 아마도 TLD시스템이 가장 유력한 것으로 나타날 것이다. 물론 필름배지나 전자선량계 또는 유리선량계도 개인선량계로서의 역할을 훌륭히 해낼 수 있다. 다만 포켓도시미터나 경보선량계는 본래의 목적이 단기간의 피폭관리용이므로 공식적 개인선량계로서는 부족한 점이 있다. 사실 단기 피폭관리도 매우 중요한 기능이므로 이들 선량계의 보조적 역할을 과소 평가해서는 아니된다. 따라서 포켓도시미터나 경보선량계는 주 선량계와 병용하여 고유의 기능을 담당하는 것만으로도 충분히 가치가 있는 것이다.

규제의 입장에서는 개인피폭선량 측정치의 신뢰도가 긴요하므로 측정의 신뢰성이 충분히 입증되는 선량계만을 공식선량계로 인정하려 한다. 미국, 우리나라 등 많은 나라에서는 아직 필름배지와 TLD만을 공식선량계로 인정하는 것이 관행이며 영국, 독일 등 유럽국가는 전자선량계도 선량계로서의 성능이 충분한 것으로 받아들이고 있는 경향이다. 이는 전자선량계가 적정 기본성능요건을 만족하면서 경보나 단기피폭평가의 보조적 기능까지 가졌다는 편의성의 장점으로 인해 앞으로 그 이용이 늘어날 것이라는

예측에서 비롯한 것으로 볼 수 있다.

2.4 선량계 이용 상황과 비용

TLD가 우수한 선량계라고 해서 모든 시설에서 TLD를 사용하기를 권고할 수는 없다. 선량계 선정의 판단 근거에는 선량계의 성능외에도 예정된 이용상황도 고려할 필요가 있다. 즉, 예정 사용자의 총수와 그중 작업종사자와 일시출입자의 구성비, 일일출입자 수, 선량측정의 주기, 이에 따른 전체적 선량측정 업무량도 판단의 요소가 된다. 또 무엇보다도 선량계 시스템의 초기투자규모와 유지비용은 중요한 고려사항이다.

비용은 동일한 시스템이더라도 운영규모에 따라 달라지고 운영방식에 따라서도 영향을 받으므로 선량계 시스템별 비용을 정량적으로 제시하기는 어렵다. 대체적으로 TLD나 유리선량계, 전자선량계 시스템은 자동화된 장비를 공급하는 만큼 설비투자규모가 비교적 커서 1~2억원 범위로 볼 수 있다. 필름 시스템도 현상과 농도측정을 자동화하려면 더 많은 비용부담이 있다. 수동방식으로는 1일 수백매 이상을 처리하기는 어렵다. TLD나 전자선량계는 선량계 하나의 단가도 상당하므로 지급대상자 규모가 수백명을 넘으면 그 비용부담도 무시할 수 없다. 단, 전자선량계는 각 개인에게 지급되는 것이 아니라 관리구역출입구에 비치하고 출입자가 임의로 착용하므로 일일출입자 수를 감당하는 수량이면 족하다.

또 한가지 간과할 수 없는 것은 측정기술의 용이성이다. 선량측정담당자의 기술능력에 따라 측정치의 신뢰도가 크게 영향을 받는 시스템의 운영을 위해서는 숙련된 고급 기술인력을 유지해야만 하는 부담이 따른다. 자동화된 시스템의 사용은 이러한 문제를 다소 완화시켜 준다. 필름배지는 이점에서는 다소 취약한 면이 있다.

장비의 고장이나 담당인력의 유고사태에도 적절한 대응책이 마련되어야 한다. 고장 장비를 수리 또는 교체하는 기간동안 대체할 수 있도록 하기 위해서는 독자적으로 예비장비를 갖추거나 가까운 타 시설에서 상

호 교환 이용이 가능케 하는 것이 필요하다.

3. 결 론

국제방사선방호위원회(ICRP)는 선량계의 기본요건을 “정상운영 또는 비상상황에서 처할 수 있는 방사선의 종류, 에너지, 선량 범위 및 선량을 범위에서 사람의 피폭선량(등가선량)을 합리적인 정밀 정확도로 측정할 수 있을 것”으로 설명하고 있다(ICRP publication 35, para graph 83). 이러한 정신에서 각국의 규제기관이나 표준기관은 선량계의 성능요건을 구체적으로 제시하고 있는데 우리 과학기술처고시 제92-15호, 미국 ANSI N13.11, 영국 HSE의 지침 등이 그 예이다.

개인의 집적선량을 측정하는 기본 선량계로 사용되고 있는 것으로는 필름배지, TLD, 전자선량계 및 유리선량계가 있으나 유리선량계는 보급률이 높지 않아 앞의 세 가지 선량계로 압축된다. 선량계로서의 선량측정 능력면에서만 평가한다면 TLD시스템이 그중 우수한 시스템으로 지목되나 필름 또는 전자선량계도 성능요건규정이 요구하는 정도는 만족할 수 있는 선량계들이다.

따라서 사용자가 선량계 시스템을 선택할 때 주로 고려해야 하는 것은 선량계 자체의 본질적 성능보다는 시스템구축과 운영을 위한 비용, 성능요건충족을 위한 운영절차의 용이성, 운영인력의 확보가능성, 예비선량계 대책 등 환경적 조건이 된다. 또 근본적으로 독자적 선량측정을 수행할 것인가 대행 업체에게 위탁할 것인가도 고려해 볼 필요가 있다.

TLD나 전자선량계는 상용 시스템이 자동화를 기본으로 하고 있는 반면 필름은 자동화 측정을 위해서는 설계제작해야 하므로 자동화부담이 매우 크다.

필름의 현상, 농도측정을 자동화하는 것은 취급 수량이 월 수만매 이상인 경우에만 정당화될 것이다. 따라서 측정수량의 범위에 따라 다음과 같이 선량계 시스템을 선정하

는 것이 합리적일 것으로 본다.

- (1) 월 수십매 단위 : 위탁
- (2) 월 수백매 : 필름배지 또는 수동 TLD 시스템
- (3) 월 500매 이상 : TLD 또는 전자선량계 시스템

이 판단은 측정수요에 따른 비용부담이 주안점을 두고 도출된 것이므로 역시 선택에는 변수가 있다. 예를 들면 중성자 선량측정이 필요한 시설이라면 겸용 가능한 TLD가 잇점이 있고 환경방사선감시 수요가 많은 시설에서는 저선량 측정요구문제로 역시 TLD시스템에 가산점을 주어야 한다. 병원에서 진료에 관한 심부선량 분포 조사나 의학적인연구목적에 적합하고 병원의 방사선작업자수 규모(아마도 수십명)라면 수동 TLD시스템이 유리할 것이다. 시설의 방사선준위가 낮아 월간 피폭선량이 수백 μSv 이하인 작업자가 대다수라면 역시 측정하한의 문제로 인해 필름은 좋은 선량계라고 볼 수 없는 것이다. 또한 전자선량계에는 단기피폭관리기능과 경보기능에 가산점을 주어야 할 것이다.

포켓도시미터나 개인경보선량계는 보조선량계로서 별도의 가치가 있고 이들은 필름배지나 TLD와 병용하는 것으로 이해하면 되겠다.

참 고 문 헌

- 1) ICRP publication 35, General Principles of Monitoring for Radiation Protection of Workers, Pergamon press(1982).
- 2) 盛光 巨外(편집), 外部被ばく そこタリグ, 日本アイントプ 協會(1986).
- 3) 丸山陸司外(편집), 外部被ばく における線量當量の 測定 評價マニュアル, 原子力安全技術センター 1988).
- 4) 과학기술처 고시 제92-15호, 개인피폭선량판독에 관한 기술기준(1992).
- 5) American National Standard for Dosimetry—Personnel Dosimetry Performance Criteria for Testing, ANSI N13.11(1983).
- 6) T. O. Marshall, D. T. Bartlett, P. H. Burgess, C. S. Cranston, D. J. Higginbottom and K. W. Sutton, "Electronic personal dosimeters", Radiation Protection Dosimetry, 34(1) pp. 93~97(1990).
- 7) T. O. Marshall, "The NRPB's Comprehensive Personal Monitoring Service : Experience and Future Progress, Nucl. Sci. J. 25(2), pp. 369~380(1988).
- 8) K. E. Duftschmid, U. Lauterbach and R. J. Pattison, "Comparison of Most Widely Used Automated TLD Readout Systems ; Rad. Protec. Dosim. 14(1), pp. 33~39(1986).
- 9) J. R. Barthe, et al., "Report on a Workshop on the Application of TLD to Large Scale Individual Monitoring, ISPRA, 11~13 Sept, 1985", Rad. Protec. Dosim., 18(1) pp. 47~61(1987).

