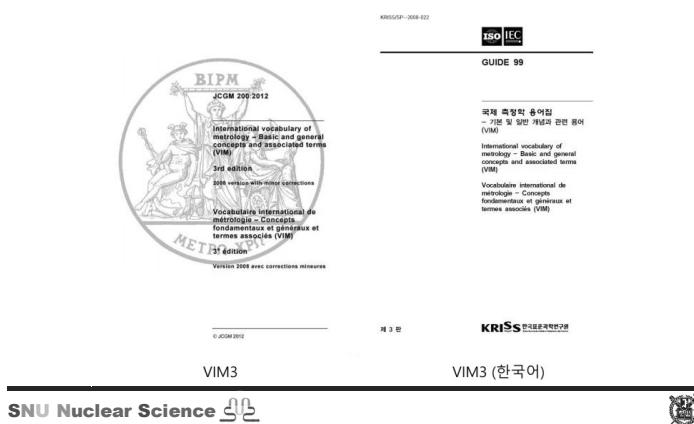


측정학 (Metrology)



측정학의 기초 용어

- 측정(Measurement):**
 - 어떤 양에 대하여 합리적으로 여겨지는 하나 또는 그 이상의 값을 실험적으로 얻는 과정 (VIM3)
 - 양을 결정하기 위한 일련의 작업(KOLAS-G-020)
- 양(Quantity):**
 - 수와 기준으로 표시할 수 있는, 크기를 갖는 현상, 물체 또는 물질의 성질 (VIM3)
 - 어떤 기준을 바탕으로 크기(number)를 정해줄 수 있는 현상이나 물체 또는 물질의 성질
- 값(Value):** 숫자와 기준에 의해서 표현되는 양의 크기(magnitude)
- 측정결과(Measurement result):**
 - 측정량에 대한 값의 집합과 이용할 수 있는 관련 정보(VIM3)
 - 측정량에 부여되는 값의 집합에 대한 정보(즉, 값과 불확도!!)

측정학의 기초 용어

측정단위(Measurement unit):

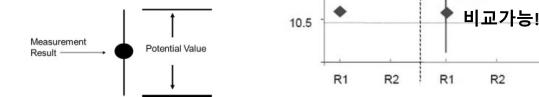
- 같은 종류의 양들의 비율을 수로 나타낼 수 있게 해주는, 협약에 의해 정의되고 채택된 스칼라 양

측정표준(Measurement standard, etalon):

- 기준으로 사용되는, 명시된 양(quality)의 값 및 연계된 측정 불확도를 가지는, 주어진 양(quan-

불확도(Uncertainty):

- 정보를 기초로 하여, 측정량에 나타내는 음이 아닌 파라미터 (parameter)
- 측정값이 얼마나 확실/불확실한지를



측정에서 고려할 요소: 단위

(1) 국제단위계(SI)

- 현재 세계 대부분의 국가에서 채택하여 사용하고 있는 단위계
- 프랑스어 'Le Système International d' Unités'에서 온 약어로서 '국제단위계'를 가리킨다.
- '미터법'이라고 부르며 사용하여 오던 단위계가 현대화된 것으로, 1960년 제11차 국제도량형총회(CGPM)에서 결정
- SI는 7개의 기본 단위가 바탕을 이루고 있으며, 이 밖의 다른 모든 단위는 이들로부터 유도되는데, 그 중 21개의 유도단위는 편의상 특별한 명칭이 주어져 있음.

International System of Measurement



Mass	Kilogram (kg)
Length	Meter (m)
Time	Second (s)
Temperature	Kelvin (K)
Electric Current	Ampere (A)
Amount of Substance	Mole (mol)
Luminous Intensity	Candela (cd)



측정에서 고려할 요소: 교정

(2) 교정(Calibration)

- 명시된 조건 하에서, 첫 번째 단계로 측정표준에 의해 제공된 양(quantity)의 값(측정불확도 포함)과 대응되는 지시값(연계된 측정불확도 포함) 사이의 관계를 확립하고, 두 번째 단계로 지시값에서 측정결과를 얻는 관계를 확립하기 위해 첫 번째 단계의 정보를 이용하는 작업.

→ 지시값과 표준에 의해 표시된 대응값 사이의 관계를 확립하는 작업

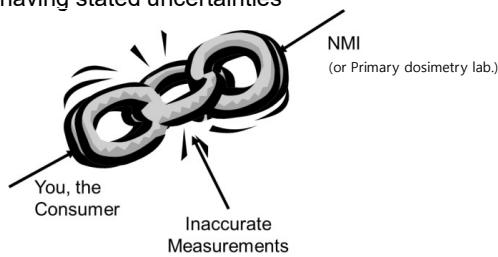


측정에서 고려할 요소: 소급성

(3) 소급성(Traceability)

- 문서화된 끊어지지 않은 교정의 사슬을 통하여 측정결과를 기준에 결부시킬 수 있는 측정 결과의 특성이며, 각 단계는 측정불확도에 기여한다.

Unbroken chain of comparisons to the SI units,
all having stated uncertainties



측정에서 고려할 요소: 불확도

(4) 불확도(Uncertainty)

- 1984 : 측정(대상)량의 추정값이 가질 수 있는 오차의 한계
(A measure of the possible error in the estimated value of the measurand as provided by the result of a measurement)

1984 ~ : 측정량의 (참)값이 속해 있는 범위를 나타내는 추정값
(An estimate characterizing the range of values with which the true value of a measurand lies (VIM 1))

1993 ~ : 측정결과에 관련하여, 측정량을 합리적으로 추정한 값의 분산특성을 나타내는 파라미터
(Parameter associated with the result of a measurement, that characterizes the dispersion of the values that could reasonably be attributed to the measurand (VIM 2))

2008 ~ : 사용한 정보를 바탕으로, 측정값의 분산을 나타내는 음이 아닌 파라미터
(Non negative parameter that characterizes the dispersion of the quantity value that are being attributed to a measurand, based on the information used. (VIM 3))



측정에서 고려할 요소: V&V

(5) 유효화와 검증(Validation and verification)

- 유효화(Validation): 명시된 요구사항이 의도된 사용에 적절한지를 검증
- 검증(Verification): 주어진 품목이 명시된 요건을 충족한다는 객관적인 증거의 제공

- 유효화: 새롭게 수정 또는 개발된 방법에 대해 필요
- 검증: 유효화 및 측정품질보증(유효화 이후)



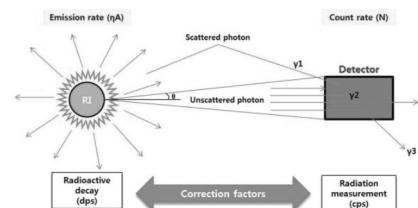
무엇을 측정하는가?

	방사선(Radiation)	방사능(Activity)
측정대상	방사선	방사선
측정단위	Sv/hr	Bq
평가지점	측정지점-평가지점 동일 (방사선 발원지 관심없음)	측정지점-분석지점 불일치 (방사선 발원의 핵증재고량)
측정방법	측정지점에 도달한 방사선의 일부를 측정(CPS) - 해당지점의 유효선량 평가(Sv/hr)	측정지점에서 도달한 방사선을 분광분석(CPS(E)) - 발원지에서 예상 되는 방사성물질의 방사능 분석(Bq)
주요보정인자	선량보정인자/계수율(cps)	검출기 효율 (측정기하, 거리, 차폐)
교정의 한계	방사선장의 재현성	매질/선원분포의 재현성



측정이 이루어지는 상황

- 방사능 A(dps)인 물질의 방사성붕괴로 방사선 방출
 - 방출된 감마선의 수 및 방출방향: $\eta(\text{감마선 방출비율}) \times A(\text{dps})$, 4π
- 방사선 검출기를 이용한 감마선 측정
 - 측정된 감마선의 수 및 입사방향: N(cps), solid angle θ



측정 대상

• Sampling Assay vs Subject Assay

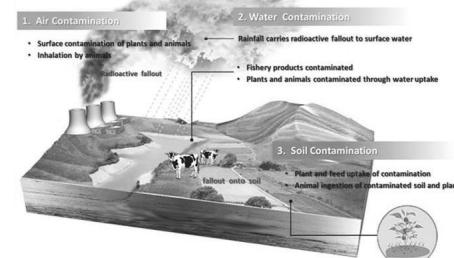
	Sampling Assay	Subject Assay
측정대상	시편	대상체 전체
측정량 (Measured Quantity)	비방사능(Bq/g)	모집단 방사능(Bq)
유도량 (Derived Quantity)	모집단 방사능(Bq)	대표 비방사능(Bq/g)
제한조건	1. 평가 대상(모집단)에 대한 충분한 특성 확보 2. 시료의 대표성 (채취위치, 채취횟수, 채취질량/ 부피, 채취시편의 차이)	1. 교정선원과 측정대상의 측정기하 일치 2. 현 측정기하에서 검출기가 측정 가능하도록 충분한 광자가 방출 3. Detector FOV에 대상체 위치 4. 교정확인검사 절차 필요
주 목적	핵종별 구성비	핵종 재고량 평가



Sampling Assay

• Sampling Assay

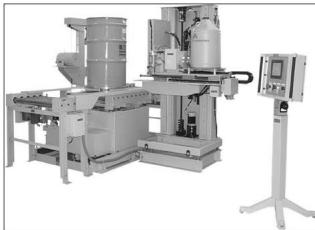
- ▶ 공기 오염
- ▶ 수질 오염
- ▶ 토양 오염
- ▶ 측정 위치 별 데이터 누적
- ▶ 측정 시간 별 데이터 누적
- ▶ 인공핵증 및 특이핵증 발견유무
- ▶ 오염 유무 확인
- ▶ 상대적 오염 강도 확인



Subject Assay

Traditional Subject Assay

- 표준용기 이용 측정장비
- 교정용기 및 표준선원 이용
- 동일 측정기와 표준선원 이용
- 비방사능
- 대표 방사능 분석



측정 방법: 절대측정과 상대측정

• 절대 측정 (정입체각법): 주요 보정 인자

- 기하학적 효과: 선원과 검출기 모양, 크기 및 거리에 의존
- 시료 효과: 시료의 재질 및 두께 등에 의존
- 검출기 효과: 검출기 입사창의 두께 검출기 고유효율 등에 의존

보정인자	보정값
기하학적 효과	기하학적 인자(f_g)
시료 효과	자기흡수 인자(f_s)
	시료 균질도(f_h)
검출기 효과	입사창의 산란 및 흡수 인자(f_w)
	검출기 고유효율(ϵ_g)
기타	검출기 및 선원 주위의 산란 및 흡수 인자(f_o)



절대측정법

$$N_E(cps) = f_g f_s f_b f_w f_a \epsilon_0 \cdots \times \eta_E A(dps)$$

$$\therefore A(dps) = \frac{N_E(cps)}{\eta_E \times (f_g f_s f_b f_w f_a \epsilon_0 \cdots)} \equiv \frac{N_E(cps)}{\eta_E \times \epsilon_E}$$

- $N_E(cps)$: 에너지 E인 감마선의 카운트수율
- $\eta_E A$: 방사성핵종의 봉괴로부터 에너지 E인 감마선의 방출률
 - A(dps): 방사성핵종의 봉괴율(방사능)
 - η_E : 에너지 E인 감마선의 방출확률
 - ϵ_E : 에너지 E인 감마선의 계수효율

- 주어진 측정 시스템에서 측정에 영향을 주는 각종 보정인자들을 평가한다.
- 에너지 E인 감마선의 계수율을 측정하여 방사능(A)을 계산한다.



상대측정법

• 표준선원(핵종 및 방사능을 정확히 알고 있는 선원)을 이용한 비교 평가

측정조건	보정인자	비고
1. 측정시료와 동일한 크기, 모양 및 재질의 표준선원	동일한 시료효과	<ul style="list-style-type: none">$f_g^{STD} = f_g^{Sample}$$f_h^{STD} = f_h^{Sample}$
2. 동일한 검출기를 사용한 계측	동일한 검출기효과	<ul style="list-style-type: none">$f_w^{STD} = f_w^{Sample}$$\epsilon_0^{STD} = \epsilon_0^{Sample}$
3. 동일한 계측조건(거리 및 주변환경)	동일한 기하학적효과 및 검출기/선원 주위의 흡수산란 효과	<ul style="list-style-type: none">$f_g^{STD} = f_g^{Sample}$$f_o^{STD} = f_o^{Sample}$

$$\epsilon^{STD} = \epsilon^{Sample}$$



상대측정법

$$A^{STD}(dps) = \frac{N_E^{STD}(cps)}{\eta_E \times \epsilon_E^{STD}} \rightarrow \epsilon_E^{STD} = \frac{N_E^{STD}(cps)}{\eta_E \times A^{STD}(dps)}$$

$$\therefore A^{Sample}(dps) = \frac{N_E^{Sample}(cps)}{\eta_E \times \epsilon_E^{Sample}} = \frac{N_E^{Sample}(cps)}{\eta_E \times \epsilon_E^{STD}}$$

- A^{STD} , A^{Sample} : 표준선원 및 측정시료 내 감마핵증의 방사능
- N_E^{STD} , ϵ_E^{STD} : 표준선원 계측시 에너지 E인 감마선의 계수율 및 계수효율
- N_E^{Sample} , ϵ_E^{Sample} : 측정시료 계측시 에너지 E인 감마선의 계수율 및 계수효율

- 표준선원을 이용한 계측으로 측정시스템의 에너지별 계수효율을 구한다.
- 측정시료 내 에너지 E인 감마선의 계수율을 측정하여 방사능(A)을 계산한다.

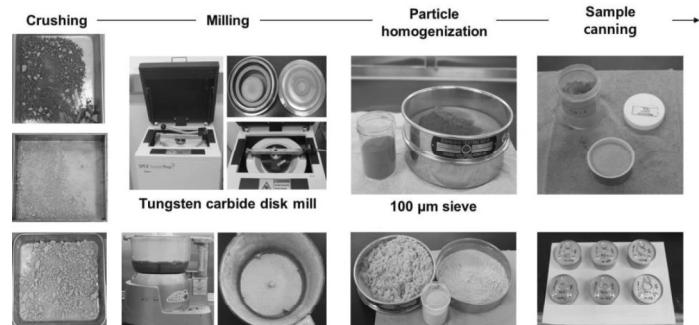


상대측정을 위한 표준선원 및 시료

• 표준선원 및 시료 측정



시료 준비 및 전처리 과정



통계적 접근

모집단

모평균(μ)
모표준편차(σ)
모분산(σ^2)
모비율(ρ)
측정불확도(U)

표본(sample)

표본평균(m)
표본표준편차(s)
표본분산(s^2)
표본비율(p)
자유도(v)

• 모집단 분포의 특징을 나타내는 대표값
• 모수(parameter)
• 신뢰구간으로 표현

• 표본 분포의 특징을 나타내는 대표값
• 통계량
• 상수로 표현



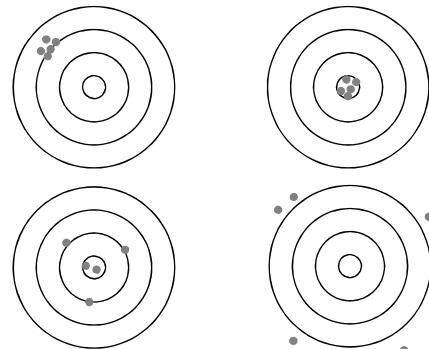
오차(Error)와 불확도(Uncertainty)

<불확도 관련 용어>

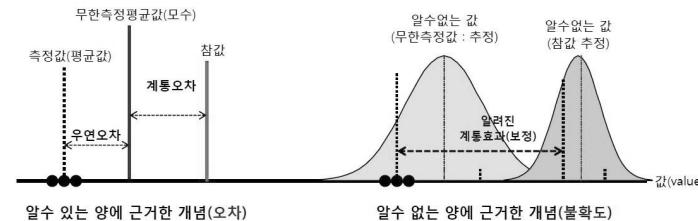
- 측정정밀도(Measurement precision): 반복 측정하여 얻어진 자시값 또는 측정값들이 일치하는 정도
- 측정정확도(Measurement accuracy): 측정값과 측정량의 참값이 일치하는 정도
- 참값(Ture quantity value): 양의 정의와 일치하는 값
※ 측정학에서 양의 정의가 본질적으로 안전할 수 없기 때문에 정의와 일치하는 단일한 참값은 없다고 본다. 따라서 일반적으로 참값은 알 수 없다고 생각한다.
- 협정값(Conventional quantity value): 주어진 목적을 위해 합의에 의하여 어떤 양에 부여한 값. (때로는 참값의 추정값이 된다.)



정확도(Accuracy) / 정밀도(Precision)



오차(Error) / 불확도(Uncertainty)



- 우연오차 = 유한측정의 평균값(측정값) - 무한측정의 평균값(모수)
- 계통오차 = 무한측정의 평균값 - 참값
- 오차 = 우연오차 + 계통오차 = 유한측정의 평균값(측정추정값) - 참값

우연오차(random error) : 반복 측정에서 예측할 수 없이 변하는 측정 오차의 성분 (VIM3, 2007) : 보정 불가
계통오차(systematic error) : 반복 측정에서 변하지 않거나 예측이 가능하게 변하는 측정오차의 성분 : 교정/보정



오차와 불확도의 구분

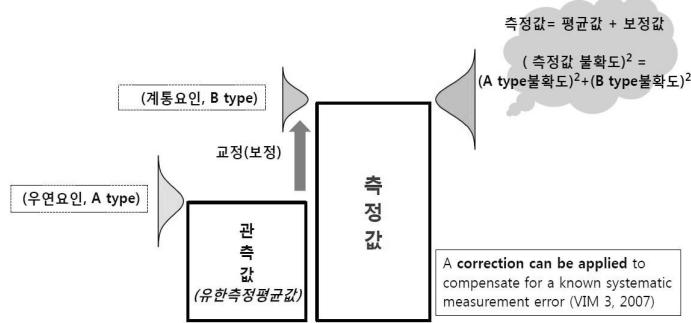
- 측정결과의 불확도는 측정량의 값을 정확하게 알 수 없다는 사실을 반영함.
- 측정결과는 이미 알고 있는 계통효과를 적절하게 보정하여도 역시 추정값에 불과함. 계통효과에 대한 완전한 보정이 불가능하고, 또 우연효과가 있기 때문에 측정결과에는 항상 불확도가 존재하기 때문이다.

따라서

- 적절한 보정을 한 후의 측정결과는 우연히 측정량의 값에 매우 가까울 수도 있으며 따라서 오차(Error)는 매우 작을 수 있다.
- 측정결과의 불확도(Uncertainty)는 매우 큼 수도 있기 때문에 불확도와 오차는 구별하여야 한다.



계통오차/우연오차 + 측정불확도



✓ 표준측정불확도(표준불확도) : 표준편차로 표현된 불확도



불확도에 관련된 용어

- 측정오차(Measurement error): 측정값에서 기준값을 뺀 값
- 기준값(Reference quantity value): 같은 종류의 양의 값과의 비교에 기준으로 사용되는 값
 - ※ 측정량의 참값 또는 협정값이 될 수 있는데, 전자의 경우 그 값을 알 수 없고, 후자의 경우는 그 값이 알려져 있다.
 - ※ 측정불확도와 함께 제공된다.
- 일반적으로, 참값은 알 수 없다고 생각한다.
정확도를 이야기할 수 없다. 불확도를 이야기한다.
측정의 결과는 불확도 범위만큼 신뢰할 수 있다.

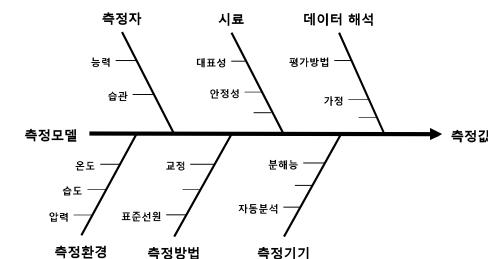


반복성/재현성

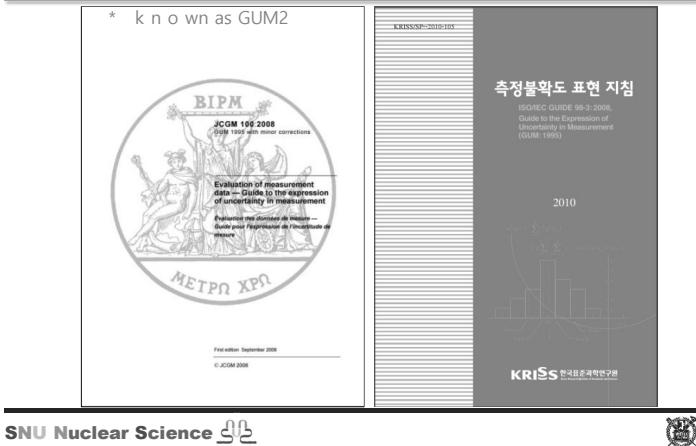
- 반복성 (Repeatability): 같은 측정 조건에서 같은 측정량을 연속적으로 측정하여 얻은 결과들 사이의 일치하는 정도
※ 같은 조건: 측정절차, 관측자, 측정기기, 장소, 짧은 시간 내 반복
- 재현성 (Reproducibility): 변경된 측정조건에서 같은 측정량을 측정하여 얻은 결과들 사이의 일치하는 정도
※ 변경 된 조건: 측정원리, 측정방법, 관측자, 측정기기, 장소, 사용조건, 시간



불확도의 요인



불확도 평가



SNU Nuclear Science



관련 문서

- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements, (GUM), ISO, 1993.
- 측정의 불확도 표현 지침, KRISS-99-070-SP,
- 측정결과의 불확도 추정 및 표현을 위한 지침, KOLAS-G-002 (2016)
- Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results, NIST Technical Note 1297, NIST, 1993.
- Quantifying Uncertainty in Analytical Measurements, EURACHEM, 1995.

SNU Nuclear Science



불확도 관련 용어

◆ 표준불확도/표준측정불확도(standard measurement uncertainty) $u(x_i)$

표준편차로 표현된 측정결과의 불확도 / 표준측정불확도

(불확도의) A형 평가/Type A evaluation (of uncertainty)

일련의 관측값을 통계적으로 분석하여 불확도를 평가하는 방법

(불확도의) B형 평가/Type B evaluation (of uncertainty)

일련의 관측값의 통계적인 분석이 아닌 다른 방법으로 불확도를 평가하는 방법

◆ 합성표준불확도(combined standard measurement uncertainty) $u_c(y)$

측정결과가 여러 개의 다른 입력량으로부터 구해질 때 이 측정결과의 표준불확도를 합성표준불확도라 한다. (주정된 y의 표준불확도, 불확도전파의 법칙)

◆ 확장불확도(expanded measurement uncertainty) $U(y)$

구간으로 정의되어지는 측정결과에 대한 양, 여기서 구간은 측정량에 대한 값의 분포 중 상당 부분이 포함될 것이라고 기대 되는 범위이다. $U(y) = k \times u_c(y)$

SNU Nuclear Science



불확도 평가: 합성표준불확도

$$\text{측정량} \rightarrow Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \leftarrow \text{입력량(들)}$$

- 모델은 측정에 필요한 모든 양을 포함한다.
- 보정은 크기가 "0"이 되더라도 불확도를 가지므로 모델에 포함되어야 한다.
- 모델이 갖는 모든 입력량들(x_i)은 표준불확도($u(x_i)$)가 평가되어야 한다.

$$\text{측정결과의 값} \rightarrow y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leftarrow \text{입력량의 값(들)}$$

$$\text{측정결과의 합성표준불확도} \rightarrow u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)}$$

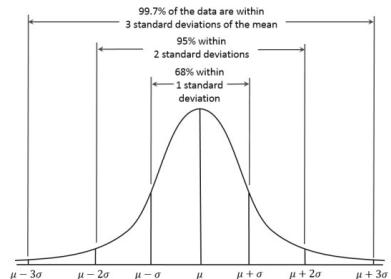
* $u(x_i, x_j)$: 공분산(covariance)

SNU Nuclear Science



불확도 평가: 표준불확도

- 모델상의 모든 입력량의 불확도는 표준불확도로 표현되어야 한다.
<- 그래야 공평하게 다룰 수 있다.
- 구간 $(x_i - u(x_i), x_i + u(x_i))$ 는 측정값의 분포가 정규분포를 따른다고 가정했을 때, 약 68 % 신뢰구간(confidence level)에 해당한다.



표준 불확도 형태: Type A&B

◆ A type 표준불확도

- : 일련의 관측값을 통계적으로 분석하여 불확도를 구하는 방법
- 유한 반복측정에 의한 표본의 표준편차를 구한 다음 모집단의 표준편차를 추정
- 통계적 방법
- 우연오차 크기의 대표값

◆ B type 표준불확도

- : 일련의 관측값의 통계적인 분석이 아닌 다른 방법으로
 불확도를 구하는 방법
- 통계적으로 직접 구하지 않은 모든 불확도
- 기존의 측정데이터
- 제조사 사양
- 기존 성적서의 정보
- 경험

⇒ 경험이나 다른 정보에 근거하여 가정한 확률분포로부터 구함



A형 불확도 / B형 불확도

- A형 표준불확도 평가
(반복측정)

- 통계적으로 계산

$$u(x_i) = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

- 자유도(v) : n-1
(예: 5회반복실험 : v = 4)

- B형 표준불확도 평가 (외부정보 활용)

- 제공되는(교정성적서등) 불확도 U 활용: U/k

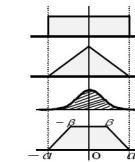
- 불확도를 모르는 경우 (표준편차 합리적 추정)

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$$

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{6}}$$

$$u = \sigma$$

$$u = \frac{\sigma \sqrt{1 + \beta^2}}{\sqrt{6}}$$



- 자유도(v) : 0.5(100/R)^2
- 충분히 신뢰하면(R=0 %): v = ∞ (=10^99)



상대측정법

- 표준선원(핵종 및 방사능을 정확히 알고 있는 선원)을 이용한 비교 평가

측정조건	보정인자	비고
1. 측정시료와 동일한 크기, 모양 및 재질의 표준선원	동일한 시료효과	<ul style="list-style-type: none"> $f_s^{STD} = f_s^{Sample}$ $f_h^{STD} = f_h^{Sample}$
2. 동일한 검출기를 사용한 계측	동일한 검출기효과	<ul style="list-style-type: none"> $f_w^{STD} = f_w^{Sample}$ $\epsilon_0^{STD} = \epsilon_0^{Sample}$
3. 동일한 계측조건(거리 및 주변환경)	동일한 기하학적효과 및 검출기/선원 주위의 흡수산란 효과	<ul style="list-style-type: none"> $f_g^{STD} = f_g^{Sample}$ $f_o^{STD} = f_o^{Sample}$

$$\epsilon^{STD} = \epsilon^{Sample}$$



상대측정법

$$A^{STD}(dps) = \frac{N_E^{STD}(cps)}{\eta_E \times \epsilon_E^{STD}} \rightarrow \epsilon_E^{STD} = \frac{N_E^{STD}(cps)}{\eta_E \times A^{STD}(dps)}$$

$$\therefore A^{Sample}(dps) = \frac{N_E^{Sample}(cps)}{\eta_E \times \epsilon_E^{Sample}} = \frac{N_E^{Sample}(cps)}{\eta_E \times \epsilon_E^{STD}}$$

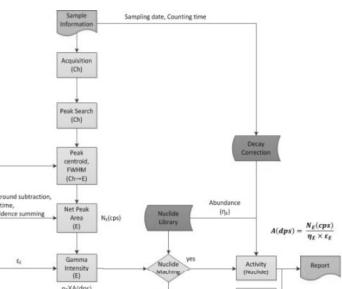
- A^{STD}, A^{Sample} : 표준선원 및 측정시료 내 감마핵종의 방사능
- $N_E^{STD}, \epsilon_E^{STD}$: 표준선원 계측시 에너지 E인 감마선의 계수율 및 계수효율
- $N_E^{Sample}, \epsilon_E^{Sample}$: 측정시료 계측시 에너지 E인 감마선의 계수율 및 계수효율

- 표준선원을 이용한 계측으로 측정시스템의 에너지별 계수효율을 구한다.
- 측정시료 내 에너지 E인 감마선의 계수율을 측정하여 방사능(A)을 계산한다.

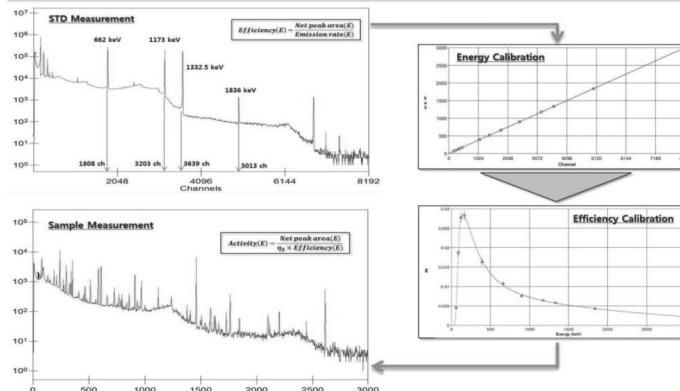


방사능 분석 절차

1. 상대측정을 위한 교정
 - Energy, FWHM, low tail
 - Efficiency
2. 계측을 통한 참피크면적 계산
 - Peak search, centroid, FWHM
 - Net peak area
3. 참피크면적의 보정
 - 백그라운드, 불감시간, 합산 등
4. 핵종판별 및 방사능 계산
 - Nuclide matching, Activity, MDA
5. 방사능 통고보정

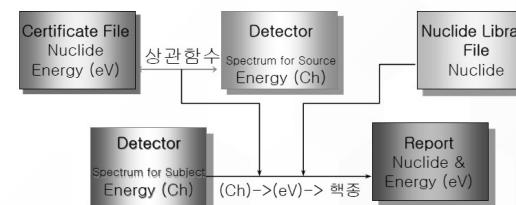


상대측정을 위한 교정 절차



검출기 에너지 교정

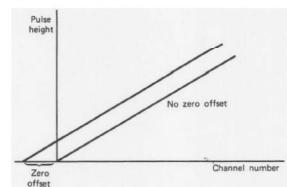
- Cert. Energy(eV)와 Detector의 Energy(Ch)과의 상관관계 형성
- 검출기 및 검출기 그룹에 대하여 각각 수행
- 검출기 1개에 1개의 효율 교정을 갖음



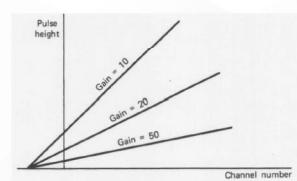
채널-에너지 교정

- Channel vs Energy, Alignment

▶ Offset

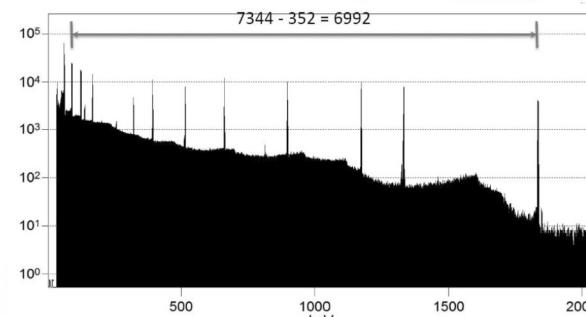


▶ Gain



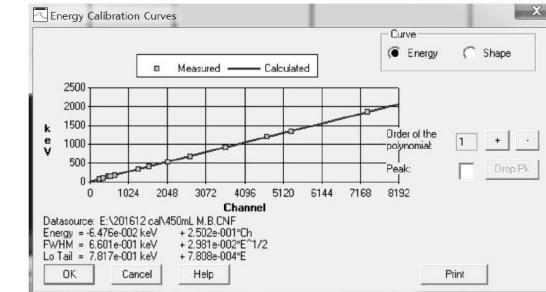
채널-에너지 교정

- Channel vs Energy, Alignment



채널-에너지 교정

- Channel vs Energy

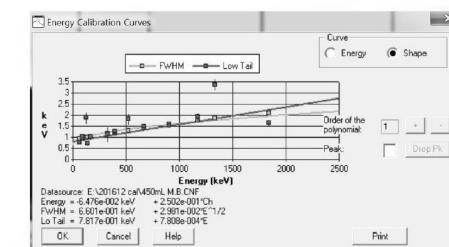


$$\text{Energy} = \text{Offset} + \text{Slope} + (\text{quadratic term})$$



Peak 분석을 통한 Energy 교정

- Peak shape vs Peak energy



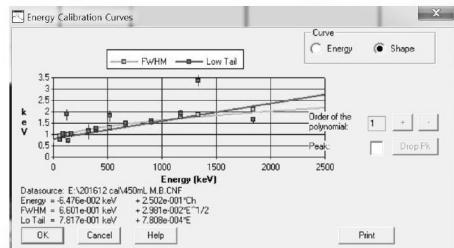
- 피크 형상 교정 결과는 인접 또는 중첩된 피크를 구별하는 능력을 향상

- 만약 피크의 폭과 에너지의 상관관계가 적절히 정의되었을 경우 중첩된 피크나 "multiplets"을 보다 정확히 분해할 수 있다.



Peak Tailing의 영향

- Tailing vs Peak energy

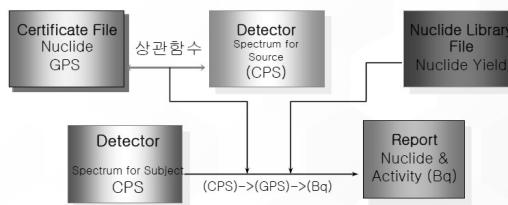


- Tailing은 함수관계가 없으나 선형관계로 근사함



검출기 효율 교정

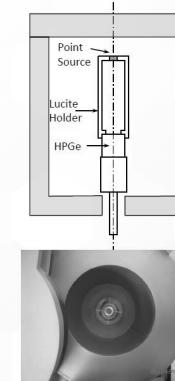
- Cert. Activity(Bq)과 Detector Activity(c/s)의 상관관계 형성
- 일반적으로 곡선의 형태 및 측정값과의 편차를 고려하여 대수다항식을 선택함
- 각각의 Geometry에 대해서 수행함



검출기 효율 교정 방법

- 1. Relative Method

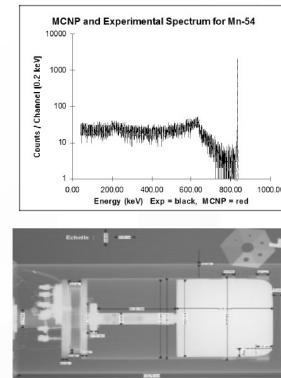
- 측정대상과 동일한 측정기하의 표준선원 사용
- 표준선원에 대한 검출기 효율을 측정대상에 동일하게 적용
- 측정정확도 매우 우수
- 제한 조건
 - 표준선원 교정에너지 범위 밖으로 외삽 금지
 - 동일 밀도, 동일 형상, 동일측정기하 만족 가능
 - 측정대상과 교정선원의 방사능은 유사



검출기 효율 교정 방법

- 2. Computer Code Method

- MCNPX Code
- Geant4 Code
- Gespeco Code
- 제한 조건
 - Detector Modeling
 - Subject Geometry Modeling
 - Shielding Geometry Modeling
 - Verification & Validation



검출기 효율 교정 방법

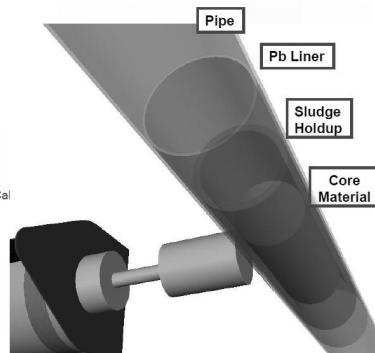
3. Semi Empirical Method

ISOCS Code

- Detector Modeling –Detector Characterization from Manufacture
- Measure the deviation between real detector and standard detector
- S/W – Standard Detector Efficiency Cal

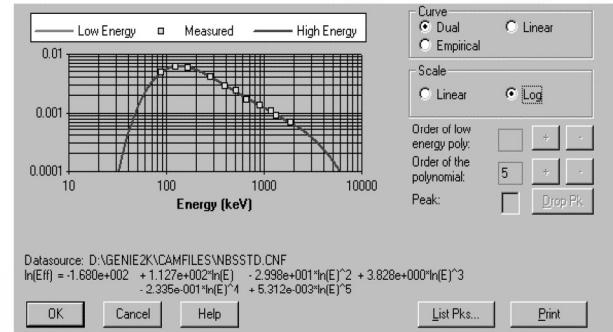
제한 조건

- Subject & Shield Geometry Modeling
- Verification & Validation



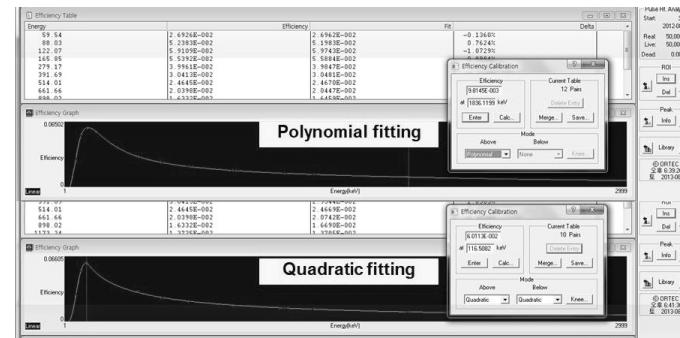
효율 교정 (Efficiency Curve)

Efficiency Curve

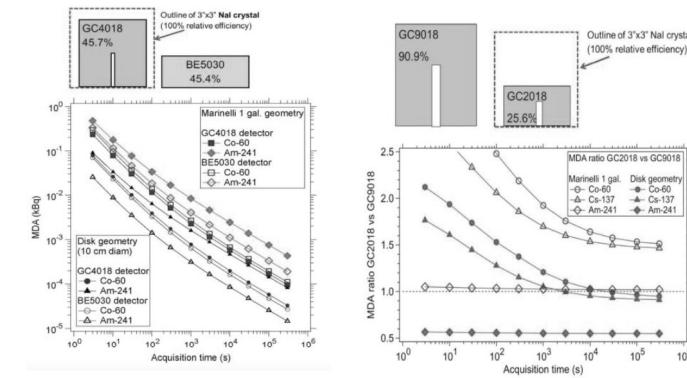


효율 교정 (Efficiency Curve)

In commercial Softwares (Gamma Vision, Genie 2K),



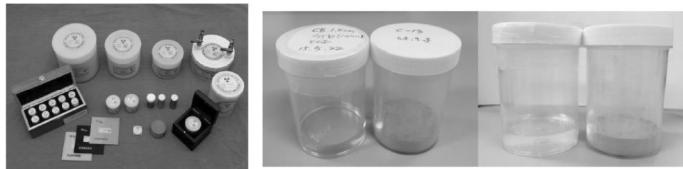
HPGe 검출기 효율 비교 결과



계측 효율 교정

❖ 효율교정

- 표준선원과 동일한 재질의 균질한 시료 준비



- Mixed gamma 표준용액 (Eckert & Ziegler)
- 핵종: Am-241, Cd-109, Co-57, Ce-139, Cr-51, Sn-113, Sr-85, Cs-137, Co-60, Y-88
- 핵종별로 50 ~ 300 gamma/s가 되도록 표준용액 희석
- 측정시료의 기하학적 구조가 동일하게 맞춤
- 표준선원 밀도: 1 g/cm³

시료의 밀도?
 • 액체시료,
 • 토양, 잡고체, ...



측정결과에 대한 보정인자

$$A = \frac{N}{m \times \varepsilon \times \gamma \times t_s \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5}$$

- A: 방사능 (Bq/kg or Bq/L)
- N: 순 계수 (net counts) → 측정결과
- m: 시료 무게 또는 부피 (kg, L)
- ε: 계수효율 (counting efficiency, peak efficiency), 밀도 1 g/cm³
- γ: 감마선(E) 방출확률
- t_s: 계측시간 (sec)
- K: 측정결과 보정인자
 - K₁, K₂: 측정시간 동안과 기준시간에 대한 방사성붕괴 보정
 - K₃: 샘플의 자체 흡수 보정
 - K₄: 우연 합산에 대한 보정
 - K₅: 동시 합산에 대한 보정



Peak Search

❖ 피크판정 조건

- 피크위치: 스펙트럼의 2차 미분조작을 통한 판별

- Gaussian-shaped functions have negative second derivatives at points near the maximum peak height (centroid)

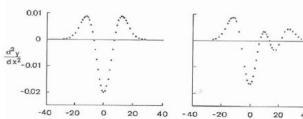
- 피크판정 조건: $n''(i) < -s \times \sigma''(i)$

- $n(i)$: 각 채널 i에서의 계수율, $n''(i)$: $n(i)$ 의 2차 미분값
- $\sigma''(i)$: $n''(i)$ 의 통계오차
- s: 피크검색의 민감도, sensitivity or significance, 2~3



- 피크중심 채널 결정

$$\text{peak centroid} = \frac{\sum i \times C_i}{\sum C_i}$$



Net Peak Area 도출

- Summing 방법: gross area – continuum

- 단일피크(singlet)에 대해 적용: default

- Non-linear LSQ fitting 방법: Gaussian fitting

- 중첩피크(multiplet)에 대해 Gaussian fitting으로 분리계산: default

- Gaussian fitting을 이용한 단일피크의 면적계산: Option



$$\text{if } S_p = N_p - \beta_l N_l - \beta_h N_h \leq 0$$



Peak Area 산정

❖ Summing 방법에 의한 순피크면적

○ 피크영역 및 baseline 영역 설정

→ 피크영역 설정: 피크의 저에너지 경계(l)과 고에너지 경계(h) 정의
 $- l \approx p - 1.6FWHM, h \approx p + 1.4FWHM, h - l \approx 3FWHM$

→ Baseline 영역 설정: 저에너지 baseline 경계와 고에너지 baseline 경계 정의

- 저에너지($l' \sim l$) 경계: $l' - l \geq \frac{1}{2}(h - l)$ 에서 정수값

- 고에너지($h' \sim h$)경계: $h' - h \geq \frac{1}{2}(h - l)$ 에서 정수값

○ 피크면적(S_p) 계산

→ $S_p = N_p - \beta_l N_l - \beta_h N_h$

- Step baseline: $\beta_l = \frac{w_p}{2W_l}, \beta_h = \frac{w_p}{2W_h}$

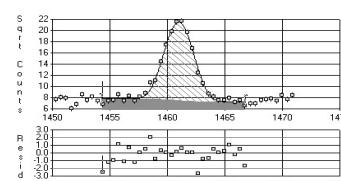
- Linear baseline:

$$\beta_l = \frac{w_p(h'+h'-l-h)}{w_l(h'+h'-l'-l)}, \beta_h = \frac{w_p(t+h-t'-t')}{w_h(h'+h'-t'-t')}$$



Peak Area 산정

• Gaussian fitting 방법에 의한 순피크면적



- Non-overlapping *single peaks* will be fitted by Gaussian functions only if the "Fit singlets" box is checked in Peak Area setup
 - (not normally recommended, but can be useful for some applications)
- Peaks considered as multiplets are always fit with Gaussian functions
- Calculation of peak areas for these conditions is performed by integrating the Gaussian function within the channel range of the established ROI



Net Peak Area에 대한 보정

• 주변 백그라운드 보정

→ Blank 시료 스펙트럼에서 확인된 피크들의 순면적(계수율)을 차감

• 불감시간 보정

→ 검출기에 입사된 감마선이 electronics를 거쳐 최종 MCA에 기록되는 동안 입사된 방사선의 계수온실

→ 순피크면적에서 **Live time**으로부터 **cps** 계산

• 우연합산(random summing or pulse pileup) 보정

→ 계수율(input count rate, ICR)에 의존하는 양

→ 주로 외부의 pulser(또는 point sources)를 이용하여 보정

• 동시합산(coincidence summing) 보정

→ 2개 이상의 감마선이 cascade 형태로 방출시 동시에 검출되어 하나의 펄스 신호로 합산되는 계수온실

→ 상용 Software에 보정기능 장착



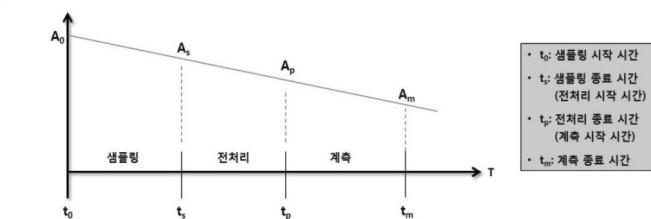
방사성 붕괴 영향 보정

❖ 붕괴 보정 방법

○ 측정하는 동안 붕괴에 의한 보정 → $A_p = \frac{\lambda(t_m - t_p)}{1 - e^{-\lambda(t_m - t_p)}} \times A_m = f_1 \times A_m$

○ 전처리하는 동안 붕괴에 의한 보정 → $A_s = e^{-\lambda(t_p - t_s)} \times A_p = f_2 \times f_1 \times A_m$

○ 샘플링하는 동안 붕괴에 의한 보정 → $A_0 = \frac{\lambda(t_s - t_o)}{1 - e^{-\lambda(t_s - t_o)}} \times A_s = f_3 \times f_2 \times f_1 \times A_m$



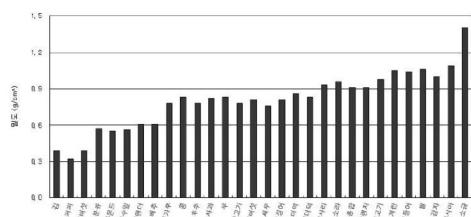
시료 밀도 보정



시료 밀도 보정

❖ 시료 특성

- 식품시료 건조밀도 범위: $0.3 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$
- 효율 교정용 표준선원: 1 g/cm^3
- 교정용 표준시료와 측정하고자 하는 식품시료의 밀도차
 - 서로 다른 자체흡수 인자: $f_s^{STD} \neq f_s^{Sample}$
 - 서로 다른 계수효율: $\varepsilon^{STD} \neq \varepsilon^{Sample}$



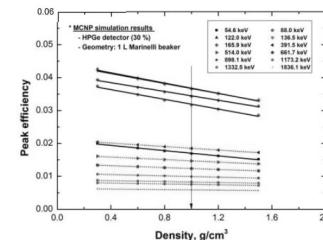
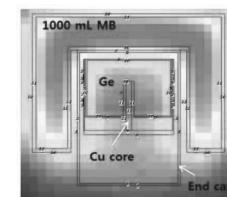
시료 밀도 보정

• 전산 모사를 이용한 밀도 보정

○ HPGe 검출기 및 시료에 대한 모델링

- Simulated detector : HPGe detector (30%)
- Sample geometry : 1 L Marinelli beaker
- Source distribution in a MB: uniform
- Sample density : $0.3 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$

○ 보정인자 계산: $K_3 = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{p=1}}$



시료 밀도 보정

❖ 밀도 보정계수 (K_3)

- 식품시료 건조밀도 범위: $0.3 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$
 - 대다수 식품시료의 건조밀도가 1 g/cm^3 이하로 예상
- 밀도 보정계수의 변화
 - 시료 밀도(ρ) $< 1 \text{ g/cm}^3 \rightarrow$ 밀도 보정계수(K_3) > 1
 - 시료 밀도(ρ) $> 1 \text{ g/cm}^3 \rightarrow$ 밀도 보정계수(K_3) < 1

❖ 방사능 분석결과 도출

- 상용 S/W의 분석결과에 밀도 보정계수 적용
 - 밀도 보정계수 결정: 몬테칼로 방법, 외부용기를 이용한 실험적인 방법

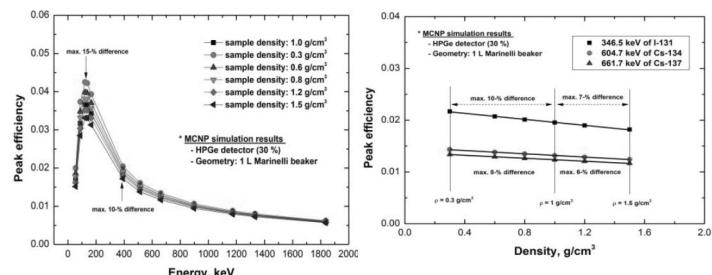
$$A^{Sample} = \frac{N_E^{Sample}}{\eta_E \times \varepsilon_E^{STD} \times K_3(E)}$$

○ 밀도 보정계수 미적용

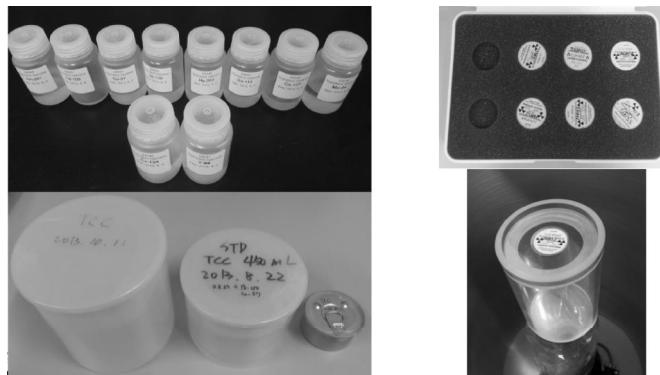
- 시료 밀도(ρ) $< 1 \text{ g/cm}^3 \rightarrow$ 방사능 분석결과: 과대평가
- 시료 밀도(ρ) $> 1 \text{ g/cm}^3 \rightarrow$ 방사능 분석결과: 과소평가



밀도 보정의 필요성



동시합산 보정



동시 합산 보정

❖ 동시합산 원인

- 분광시스템의 필스성형 시간($\sim\mu s$) 동안 다른 event가 입사하여 기록될 때 발생

❖ 합산의 종류

○ 우연합산(random summing, pulse pile-up)

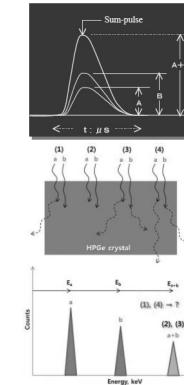
- 계수율에 의존 (energy, geometry 무관)
- Pulser를 이용하여 보정 가능

○ 동시합산(coincidence summing, cascade summing)

- 핵종별 봉괴구조에 의존, 합산결과 피크면적 감소
- 계수율과 무관, 시료와 검출기의 geometry에 의존

❖ 동시합산 특성

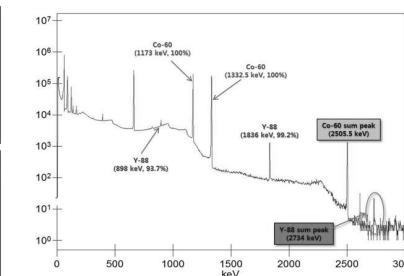
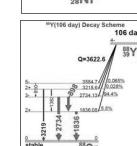
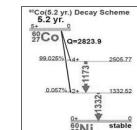
- 선원과 검출기 사이의 거리에 반비례
- 큰 검출기 및 우물형 검출기에서 효과 증대
- 얇은 창의 검출기에서는 X선과 동시합산 효과 증대
- 해결방안: 비교 방사능 측정, 동시합산 효과 보정



동시 합산 보정

• 효율교정시 동시합산 효과

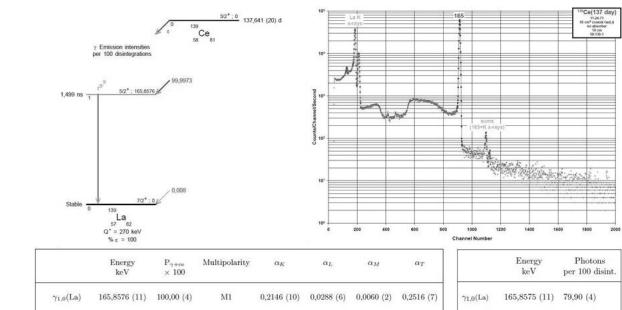
- 축차붕괴(cascade decay)



동시 합산에 영향을 주는 인자

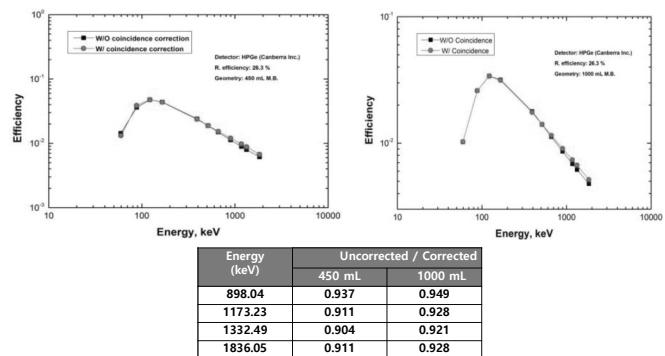
○ 내부전환(internal conversion) 과정

- 내부전환전자의 방출로 공백이된 K-각(L, M, ...) 내의 전자 재배치 과정에서 특성 X-선이 방출되며, 이와 γ 선과의 동시합산



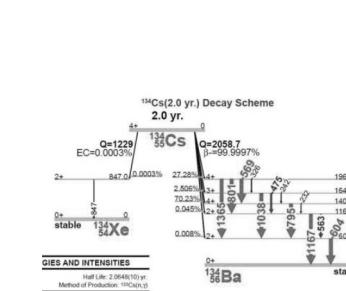
동시 합산 보정의 영향 – 계측 효율

• 계측 효율 교정 시



동시 합산 보정 – 시료 분석

• 시료 분석 시 동시 합산 효과



품질관리(Quality Assurance)

◆ 권고하는 QA Parameter의 정의 (선원 사용) – Step-2

▶ System Gain(시스템의 이득률)

– 피크의 중앙 채널 및 피크의 중앙 에너지를 이용하여 추적

▶ System Efficiency(시스템의 효율)

– 피크의 면적(일정한 계측시간) 및 피크의 계측률 또는 핵종에 따른 발사선 불균수정 후 발사능을 이용하여 추적

▶ Detector resolution (Peak Shape; 검출기의 분해능 (피크의 형상))

– 실제 측정된 피크의 반치폭을 이용하여 추적(QA 계측에 사용하는 자동분석 파일에 “Use fixed FWHM” 옵션이 체크되지 않아야 수행함)

주의: 위에서 언급한 설정 상수는 “저 에너지” 피크(60 – 662keV) 및 “고 에너지” 피크(>1332keV)에 대해서 각각 추적해야 함.

[권고하는 선원: Eu-152 (Am-241포함 및 포함하지 않는), Co-60+Cs-137]

품질관리(Quality Assurance)

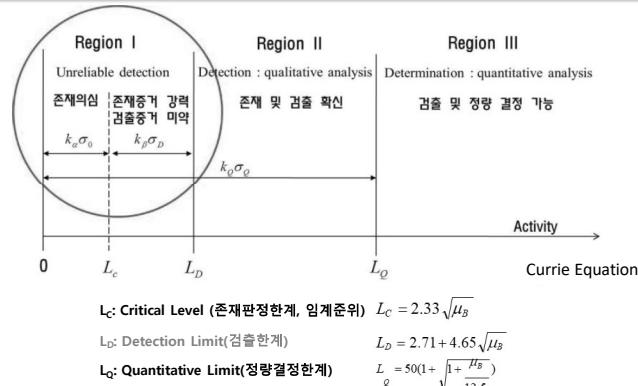
◆ 권고하는 QA Parameter의 정의 (선원미사용) – Step-2

▶ System Background(시스템의 자연방사능)

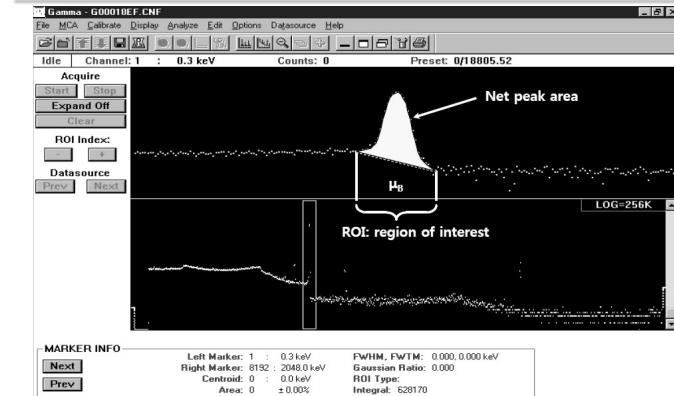
- 자연방사능 계측 수(일정한 계측시간) 또는 자연방사능 계측률을 이용하여 추적함
- 측정된 스펙트럼의 두(2) 대역에 대한 자연방사능 계측수를 더함 (최저에너지 ~ 10%, 최고에너지 ~ 90%)
- 심각한 자연방사능 변동은 대상체 계측 결과인 방사능 및 MDA 결과에 영향을 미침
- 측정을 위해 차폐체 내에 모든 방사성 선원을 제거함
- "Environmental Background"계측 : 자연방사선 스펙트럼에서 지속적으로 피크가 발견될 경우 피크의 면적 보정을 위해 수행함.



Minimum Detectable Amount (MDA)



여전히 이것이 문제…



검출 한계 vs. 검출 농도

검출한계	최소검출농도
<ul style="list-style-type: none"> - 통계적인 요동만 고려(계측통계학) - 백그라운드 요동 및 측정시간(백그라운드 및 샘플계측시간) - 계측기 고유의 특성 	<ul style="list-style-type: none"> - 검출한계로부터 유도 - 검출효율, 시료크기, 측정시간, 자기흡수 등 통계요인에 측정 시 실제 필요한 양을 포함 → 물리량으로 환산 - 계측기 특성+계측과정을 모든 인자 포함

$$MDA = \frac{L_d}{t_m \times V(\text{or } m) \times \varepsilon \times \gamma} = \frac{2.71 + 4.65\sqrt{\mu_B}}{t_m \times V(\text{or } m) \times \varepsilon \times \gamma}$$



Minimizing MDA

▶ MDA

❖ MDA를 낮추려면? → 시간 및 사회적 비용

