

Counting Strategies in Radioactivity Measurement for the Monitoring and Screening

Kyung-Won Seo

Korea Atomic Energy Research Institute
150 Dukgin-dong, Yusong-gu, Taejon 305-353, Korea

방사능 존재확인 및 정량분석시 최적화된 측정시간의 결정을 위한 계측전략

서경원

한국원자력연구소 원자력연수원
(1997년 7월 10일 접수, 1998년 7월 4일 채택)

Abstract - One of the important things in low level radioactivity measurement is determination of the optimized counting time. Counting strategy has to be established, in order to count the radioactivity of the sample by condition of optimized measurement. There were three kinds of counting strategies in this report ; about fixed time, about fixed count, to compared sample, background, and reference level. The best of them was satisfied condition to give about condition of instrument and process, as an example, efficiency of detector, counter capacity, maximum and average background count rate of counter, reference level and limit of decision and detection, etc. Therefore, we can decide the optimized counting time in the screening and monitoring. And we can save the time for counting the sample of course the data of count will be counted by optimized accuracy. Finally, in routine measurement of radioactivity these strategies will be used available.

요약 - 저준위방사능 계측에서 가장 기본적으로 요구되는 것이 최적 측정시간의 결정이다. 최적화된 계측전략으로 측정시간을 결정하기 위하여 측정시간을 고정하는 방법, 측정값을 고정하는 방법, 시료와 자연계수율 또는 기준준위를 비교하여 측정하는 방법을 비교 검토하는 결정식을 도출하였다. 이 계측전략에서 기기에 주어진 측정조건 즉, 검출기의 효율, 측정기의 용량, 측정기의 최대 및 평균 자연계수율과 관련기준 즉, 기준준위, 검출한계 등을 만족하는 측정시간이 결정된다. 계측전략은 측정시 주어진 조건에서 방사능 존재확인 및 정량분석에 대한 시료의 최적 측정시간의 결정을 편리하게 함으로써 일상의 저준위방사능 측정에 유용하게 사용될 것이다

서론

저준위방사능 측정에서 믿을 만한 결과를 얻기 위해서는 충분한 수의 신호가 수집되는 측정이어야 한다. 방사능 존재확인 및 정량분석에서도 이런 가정을 전제로 하고 있다.

방사능 존재확인 범위에서는 시료에 방사능이 없다는 영점가정(H_0)을 이용하며, 정량분석 범위에서는 관리기준을 넘는 시료에서 방사능이 있다는 것을 가정한 것이다. 영점가정에서 참이 아닌 것은 존재확인 절차에서는 검출된다는 의미이고,

정량분석 절차에서는 분석에 기여한다는 것이다.

계측전략으로는 측정시간을 고정하는 방법, 측정값을 고정하는 방법, 시료와 자연계수율 또는 기준준위를 비교하여 측정하는 방법을 비교 검토하는 결정식을 도출하며, 이 계측전략에서 기기에 주어진 측정조건 즉, 검출기의 효율, 측정기의 용량, 측정기의 최대 및 평균 자연계수율과 관련기준 즉, 기준준위, 검출한계 등을 만족하는 측정시간이 결정된다

이 논문에서는 방사능 존재확인 및 정량분석시 이상과 같이 최적측정시간 결정의 계측전략을 만

들어 계산결과를 확인한 다음 실제측정시 예상결과와 비교검토하여 계측전략의 합리성을 보이려 한다. 이것은 마이크로프로세서내의 실시간분석과 방사능결정 알고리즘에 포함되면 보다 유용하게 될 것이다.

계측전략 이론

기본계측전략

방사능측정시 시료의 순계수에 대한 판단영역은 그림 1에서와 같이 방사능의 존재여부의 결정한계 (Limits of critical, L_c), 검출가능한 최소의 한계인 최소검출한계(Low Limits of detection, L_D), 정량적 결정의 한계인 정량한계(Limit of determination, L_Q)로 구분한다[1]. 계측전략을 결정하는데 사용되는 주요 변수의 정의는 표1과 같으며 측정시간에 관한 규칙들의 모음은 다음과 같다.

- (1) t^I 은 측정시간을 이용하여 최적측정시간을 결정하는 것으로, $t > t^I$ 일 때까지 계속하거나 반복하여 측정해야 한다,
- (2) t^{II} 는 측정값이 정해진 양에 도달할 때까지 측정을 계속하여 최적측정시간을 결정한다.
- (3) t^{III} 는 시료와 자연계수율 또는 기준준위와 비교하여 조건에 따른 최적측정시간을 선택한다. 즉 측정시 검출기의 효율, 계측기의 용량, 계측기의 최대 및 평균 자연계수율, 기준준위, 최소검출한계 등을 측정조건으로 선정하여 판별함으로써 최적 측정시간을 결정한다.

계측전략의 첫번째 단계는 전략을 만드는 것이고, 두번째 단계는 그것의 유용성을 시험 확인하는 것이다.

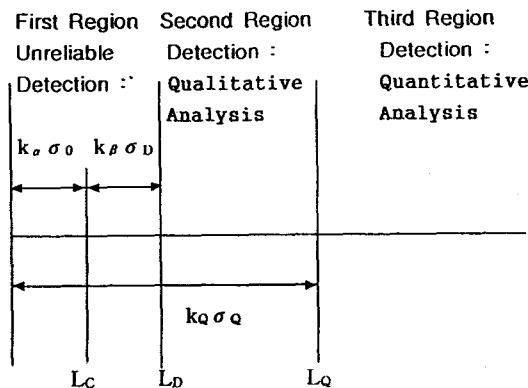


Fig. 1. The three principal analytical regions[1].

실행계획의 목적은 측정시 최초 측정값의 발견으로부터 시작하여 확인된 양의 정확성을 판단할 수 있게 하는 데까지를 결정하는 것이다. 따라서 실행계획의 절차[2]는 처음에 단순한 문제(단순한 계측조건과 통계)로 시작한 다음 문제의 조건에 따른 해답을 설명한다. 그 다음에는 복잡한 문제로 전환한다.

방사능 존재확인시 측정시간 결정전략

시료를 측정할 때 첫번째 문제는 시료상에 방사능이 있는가 하는 것이다. 그때를 위해 자연계수율과 빈시료의 계수율(background and blank)을 구분하여 정의해야 한다. 이 경우 시료에는 자연계수율이나 빈시료보다 더 많은 방사능이 있는지를 확인해야 한다. 그러므로 이것은 평균, 표준편차 등 방사능 그 자체를 요구하는 사항인 양적인 결정은 요구되지 않고 방사능이 있는지의 존재여부를 확인하자는 것이다.[3]

계측전략을 설정하기 전에 기본배경으로 측정장치가 주어지고, 그 측정기의 효율 ϵ 가 정해져야 한다.

방사능 존재를 확인하기 위하여 검출감도인 A_D 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$A_D = \frac{\dot{L}_D}{\epsilon} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, \dot{L}_D 는 최소검출한계율이며, A_D 값에서 최대인 A_{Dmax} 가 방사능의 존재확인 목적에 적합한 준위로 결정된다. 그러나 A_D 에서 시료에는

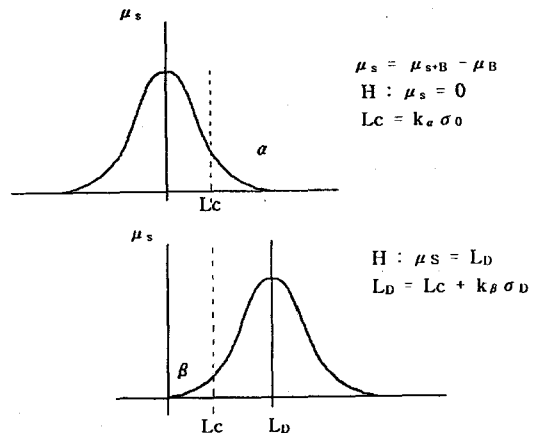


Fig. 2. L_D, L_c at confidence region[1].

Table 1. Symbols used in the report.

Symbol	Meaning	Symbol	Meaning	Symbol	Meaning
A	Activity	α	Significance level of alpha	r_{Bmax}	Maximum background count rate
A*	Total activity	β	Significance level of beta	r_D	Detection count rate
A_D	Detection activity	L_C	Limits of critical	r_R	Reference count rate
A_{Dmax}	True maximum detection activity	L_D	Low limits of detection	R	True reference level
B	Actual background	L_{Dmax}	Limits of true maximum detection	R'	Actual reference level
\dot{B}	Background rate	L_{Dmax}	Limits of actual maximum detection	S	Actual sample activity
\dot{B}^*	Total background rate	L_{Dmax}	Limits of actual maximum detection rate	t	Counting time
\bar{B}	Average background	L_D^*	Limits of total detection rate	t_{MAX}	True maximum counting time
B_{MAX}	True Maximum background	L_M	True monitoring level	t_{max}	Actual maximum counting time
\dot{B}_{MAX}	True Maximum background rate	L'_M	Actual monitoring level	t^*	Total counting time
B_{max}	Actual maximum background	L_P	True planning level	T	Reduced counting time
\dot{B}_{max}	Actual maximum background rate	L'_P	Actual planning level	T_{MAX}	Maximum reduced counting time
ϵ	Efficiency of instrument	L_Q	Limit of determination	u_B	True background count
k	General tolerance level	r	Count rate	u_S	True sample count
k_α	Tolerance level of alpha	r_B	Background count rate	σ_R^2	Variance
k_β	Tolerance level of beta	r'_B	Minimum background count rate		

빈시료보다 더 많은 방사능이 있는지를 확인하여야 한다. 이때 이를 점검하기 위한 영점가정인 H_0 는 다음과 같이 정의된다[5].

$$H_0 : u_S < L_C \dots\dots\dots (2)$$

여기서, L_C 는 방사능의 존재여부를 정하는 결정한계이다. 만약 H_0 가 참이라면, 그때는 그림 2에서 보여준 바와 같이 신뢰구간 $1-\beta$ 에서 $u_S < L_C$ 이다. 여기서 관행적으로 $\alpha = \beta = 0.05$ 이며

만약 특별한 이유가 있다면, 다른 값이 될 것이 다[6].

계측전략을 설정하기 위한 최소검출한계인 L_D 는 각각 다음과 같이 정의된다[1,4].

$$L_D = k^2 + ak\sqrt{u_B} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 자연계수율이 명확하다면 $a=2$ 이고, 반복측정된 경우라면 $a=2\sqrt{2}$ 이다.

Table 2. Solution of $\dot{L}_{D_{max}}, \dot{t}_{max}, \dot{B}_{max}$

Basic function	$L_D = k^2 + 2k\sqrt{u_B}$	$L_D = k^2 + 2\sqrt{2}k\sqrt{u_B}$
$\dot{L}_{D_{max}} = \dot{L}_D(\dot{t}_{MAX}, \dot{B}_{MAX})$	$\frac{k^2}{\dot{t}_{MAX}} + 2k\sqrt{\frac{\dot{B}_{MAX}}{\dot{t}_{MAX}}}$	$\frac{k^2}{\dot{t}_{MAX}} + 2\sqrt{2}k\sqrt{\frac{\dot{B}_{MAX}}{\dot{t}_{MAX}}}$
$\dot{t}_{max} = t(\dot{L}_{D_{MAX}}, \dot{B}_{MAX})$	$\frac{k^2}{\dot{L}_{D_{MAX}}} \left(1 + \frac{2(1 + \sqrt{R_{MAX} + 1})}{R_{MAX}}\right)$	$\frac{k^2}{\dot{L}_{D_{MAX}}} \left(1 + \frac{2(2 + \sqrt{2}\sqrt{R_{MAX} + 2})}{R_{MAX}}\right)$
$\dot{B}_{max} = \dot{B}(\dot{L}_{D_{MAX}}, \dot{t}_{MAX})$	$\frac{T_{MAX} \left(\dot{L}_{D_{MAX}} - \frac{1}{T_{MAX}}\right)^2}{4}$	$\frac{T_{MAX} \left(\dot{L}_{MAX} - \frac{1}{T_{MAX}}\right)^2}{4}$
$R = \frac{\dot{L}_D}{\dot{B}}$	$R_{MAX} = \frac{\dot{L}_{D_{MAX}}}{\dot{B}_{MAX}}, T_{MAX} = \frac{t}{k^2}$	$R_{MAX} = \frac{\dot{L}_{D_{MAX}}}{\dot{B}_{MAX}}, T_{MAX} = \frac{t}{k^2}$

만약 자연계수율이 \dot{B} 라면, 참값의 최대자연계수율인 \dot{B}_{MAX} 는 장비의 잡음과 반시료의 계수가 포함된 것이다[6].

$u_B \cong \dot{B}t$ 관계를 이용한다면 표 2와 같이 참값의 최대값인 (MAX)로부터 측정값의 최대값인 (max)값을 계산할 수 있으며, 그 결과로

$\dot{L}_{D_{max}}, \dot{t}_{max}, \dot{B}_{max}$ 값을 구할 수 있다.

측정값으로 선택된 값이 참값이라면 각각 $t^* = T_{MAX}, \dot{B}^* = \dot{B}_{MAX}, \dot{L}_D^* = \dot{L}_{D_{MAX}}$ 이 된다.

계측전략 I은 측정시간만을 이용하여 최적측정시간을 구하는 경우이다. 즉 $t^* \gg t^*$ 이 참일 때 측정을 완료한다.

계측전략 II는 측정값을 이용하여 최적측정시간을 구하는 경우이다. 즉 $S + B \gg L_D^*$ 이 참일 때 측정을 완료한다. 최대측정시간은 $S=0$ (신호 없음)일 때이며, 평균시간은 $\bar{B} = L_D, \bar{t} = f(k)$ 일 경우이다.

계측전략 III은 측정조건에 따라 측정이 완료되

나 최적측정시간이 결정되지 않는다. 즉 $S \gg L_C$ 일때, $\bar{t} = f(S/B)$ 일 경우이지만 최적측정시간은 아니다.

계측시간을 결정하기 위해서 먼저 $f(k)$ 와 $f(S/B)$ 의 함수를 구하려면 다음과 같이 식(3)을 이용하여야 한다.

이 때, 식(3)에서 $u_B = u_B(t)$ 를 의미한다. 여기서 최소검출한계는 고유감도인, A^* 와 그 때의 측정시간 및 계측효율로 나타낼 수 있다. 즉

$$L_D = \epsilon A^* t_D \dots\dots\dots (4)$$

이며, 여기서 ϵ 는 전체 효율이다. 그리고 계수를 r_D, r_B 을 각각 $r_D = \epsilon A^*, r_B = \frac{u_B}{t}$ 이라면 그때 식 (3)은 다음과 같이 된다.

$$r_D t = k^2 + a k \sqrt{r_B t} \dots\dots\dots (5)$$

만약 “함축된시간” 인, $T = \frac{t}{k^2}$ 으로 나타낸다면 그 결과는

$$r_D T = 1 + a \sqrt{r_B T} \dots\dots\dots (6)$$

이다. 이것을 T 에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2r_D^2} (2r_D + a^2 r_B + \sqrt{4a^2 r_B r_D + a^2 r_B}) \dots\dots (7)$$

새로운 변수 $Y \equiv \frac{r_B}{r_D}$ 를 사용하면 $T = \frac{1}{r_D} f(Y)$

Table 3. Function of f(Y).

Y	Log Y	Log f (Y)	Y	Log Y	Log f(Y)
0.0001	- 4.00000	0.008685	1	0	0.765551
0.0002	- 3.69897	0.012283	2	0.301029	0.995590
0.0003	- 3.52287	0.015043	3	0.477121	1.143895
0.0004	- 3.39794	0.017370	4	0.602059	1.253925
0.0005	- 3.30102	0.019420	5	0.698970	1.341522
0.0006	- 3.22184	0.021273	6	0.778151	1.414329
0.0007	- 3.15490	0.022978	7	0.845098	1.476637
0.0008	- 3.09691	0.024564	8	0.903089	1.531102
0.0009	- 3.04575	0.026053	9	0.954242	1.579482
0.001	- 3.00000	0.027462	10	1.000000	1.623002
0.002	- 2.69897	0.038831	20	1.301029	1.913749
0.003	- 2.52287	0.047550	30	1.477121	2.086330
0.004	- 2.39794	0.054897	40	1.602059	2.209498
0.005	- 2.30102	0.061367	50	1.698970	2.305340
0.006	- 2.22184	0.067213	60	1.778151	2.383807
0.007	- 2.15490	0.072586	70	1.845098	2.450243
0.008	- 2.09691	0.077585	80	1.903089	2.507851
0.009	- 2.04575	0.082278	90	1.954242	2.558705
0.01	- 2.00000	0.086714	100	2.000000	2.604223
0.02	- 1.69897	0.122431	200	2.301029	2.904173
0.03	- 1.52287	0.149701	300	2.477121	3.079904
0.04	- 1.39794	0.172580	400	2.602059	3.204662
0.05	- 1.30102	0.192639	500	2.698970	3.301463
0.06	- 1.22184	0.210687	600	2.778151	3.380572
0.07	- 1.15490	0.227207	700	2.845098	3.447468
0.08	- 1.09691	0.242511	800	2.903089	3.505421
0.09	- 1.04575	0.256818	900	2.954242	3.556543
0.1	- 1.00000	0.270288	1000	3.000000	3.602277
0.2	- 0.69897	0.376539	2000	3.301029	3.903198
0.3	- 0.52287	0.454692	3000	3.477121	4.079253
0.4	- 0.39794	0.518074	4000	3.602059	4.204174
0.5	- 0.30102	0.571947	5000	3.698970	4.301073
0.6	- 0.22184	0.619050	6000	3.778151	4.380247
0.7	- 0.15490	0.661030	7000	3.845098	4.447189
0.8	- 0.09691	0.698970	8000	3.903089	4.505177
0.9	- 0.04575	0.733625	9000	3.954242	4.556326
1	0	0.765551	10000	4.000000	4.602081

이다.

계측전략 I(측정시간을 이용)에서 계측시간은 ϵA^* , $r_{B_{MAX}}$ 가 기본으로 되어있다. 그래서

여기서 $f(Y) = 1 + \frac{a^2}{2} Y(1 + \sqrt{\frac{a^2 Y + 4}{a^2 Y}})$ 이고,
 그 값들은 표 3과 그림 3과 같다.

$$Y_{MAX} = \frac{r_{B_{MAX}}}{r_D} \text{ 일 때}$$

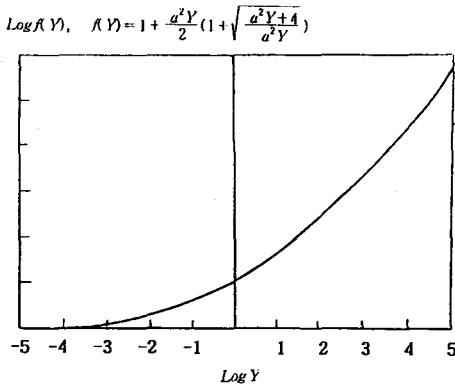


Fig. 3. Graph of f(Y).

$$T^I = \frac{1}{r_D} f(Y_{MAX}) \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{이며, } Y = \frac{r_{BMAX}}{\epsilon A^*} \text{ 일 때 } t^I = \frac{k^2}{r_D} f(Y) \dots\dots\dots (9)$$

이다.

계측전략 II에서 $t = t(r_B)$ 는 실제 자연계수 측정시간은 가장 작은 자연계수와 빈시료의 계수로 결정된다.

자연계수를 명확히 알고 있는 경우에는 $Y = \frac{r_B}{\epsilon A^*}$ 을 식(8)에 적용하여 t^II 를 계산한다. 여기서 r_B 는 자연계수율에 가장 접근한 것이다. 그러므로

$$T^{II} = \frac{1}{r_D} f(Y) \text{ 이고, } Y = \frac{r_B}{\epsilon A^*} \text{ 일 때}$$

$$t^II = \frac{k^2}{r_D} f(Y) \dots\dots\dots (10)$$

이다.

반복측정인 경우에는 L_D 계수가 도달할 때까지 빈시료를 측정한다. 측정시간은 다음의 함수에 의해서 실제시간이 설정된다.

$$D(t, B) = k^2 + ak\sqrt{B} - \epsilon A^* t \dots\dots\dots (11)$$

만약 " $D(t, B) > 0$ "이 참이면 측정을 계속하고, 거짓이라면 측정을 멈춰야 한다. 그 후 $(S+B)$ 는 같은 시간으로 측정된다. 자연계수율 r_B 가 일정하다면, 측정시간의 기대값은 다음과 같다.

$$Y = \frac{r_B}{\epsilon A^*} \text{ 일 때, } t^{III} = \frac{k^2}{\epsilon A^*} f(Y) \dots\dots\dots (12)$$

만약 계측전략 II가 계측전략 I 대신 사용된다면, $S+B$ 와 B 에 대한 측정시간과 함측시간은 다음과 같으며 그 의미는 그림 4와 같이 나타낼 수

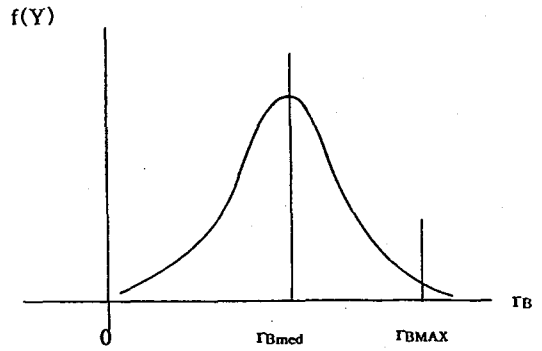


Fig. 4. Location of r_{Bmed} , r_{BMAX} , f(Y).

있다.

$$\frac{t^{III}}{t^I} = \frac{f(Y)}{f(Y_{MAX})} \dots\dots\dots (13)$$

계측전략 III에서 시료의 방사능이 결단한계 이하일 때, 즉 $S < L_C$ 이면, $(r_{S+B} - r_B)t < \frac{ak}{2}\sqrt{r_B t}$ 이므로 직접 결정하지 않고 계측전략 I이나 계측전략 II로 돌아가서 그 때 결정한다. 이것을 $L_C = \frac{ak}{2}\sqrt{B}$ 에서 r_B 로 정리하면 $L_C = \frac{ak}{2}\sqrt{r_B t}$, $S = (r_{S+B} - r_B)t$ 이다.

시료의 방사능이 결단한계 이상일 때, 즉 $S > L_C$ 일 때, $(r_{S+B} - r_B)t > \frac{ak}{2}\sqrt{r_B t}$ 이므로

$$C(r_i, t) = (r_{S+B} - r_B) - \frac{ak}{2}\sqrt{\frac{r_B}{t}} > 0 \text{ 이다.}$$

$$\text{따라서 } t = \frac{a^2 k^2 r_B}{4(r_{S+B} - r_B)^2} \dots\dots\dots (14)$$

이고, 여기서 $R_S = \frac{r_{S+B}}{r_B}$ 라면

$$t^{III} = \frac{a^2 k^2}{4r_B(R_S - 1)^2} \dots\dots\dots (15)$$

이다.

그러므로 만약 R_S 에 대하여 $C(r_i, t) = 0$ 을 풀었다면 $t^{III} = t^I$ 또는 $t^{III} = t^{II}$ 이다. 그러나

만약 $R_S = R_S^*(t^{III} = t^{II})$ 이라면, 즉 자연계수율보다 시료의 계수율이 아주 많다면 t^{III} 는 더 짧아지게 된다[7].

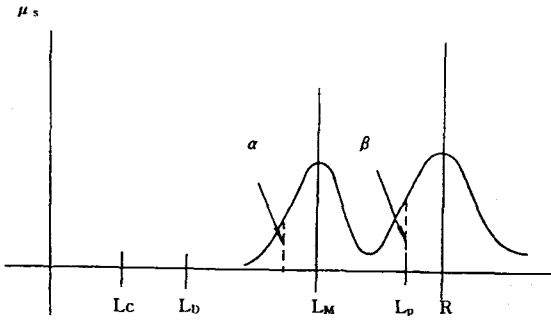


Fig. 5. Region of L_M , L_P , R .

방사능 정량분석시 측정시간 결정전략

방사능 측정분석의 기본목적은 측정된 계수가 참고준위를 넘는지 아닌지를 결정하는 것이다. 그림 5에는 방사능 정량분석준위(L_M)와 결정준위(L_P)와 기준준위(R)를 나타내고 있다. 기준준위(R)는 준위를 기록하는 공적인 준위를 말하며, Currie[1]에서는 정량한계(L_Q)라고 정의된 준위이다. 그림 5에 의하면, 다음과 같은 관계를 가정할 수 있다.

$$L_P = R - k_\beta \sigma_R \quad \dots\dots\dots (16)$$

$k_\alpha = k_\beta = k$ 로 단순화 시켰다면 $L_P = R - k\sigma_R$ 이 된다. 여기서 $\sigma_R^2 = R + u_B \approx R + B$ 이고, u_B (참값) $\approx B$ (측정값)이다. $S = R$ 일 때 σ_R^2 은 분산이다. 그 때의 총계수치는 서로 같다.[8] 즉 $S = R$ 에서 $\sigma_R^2 = u_{S+B}$ 은 $\sigma_R^2 = R + B$ 이 된다. 따라서 결정준위, L_P 는 다음과 같이 된다.

$$L_P = R - k\sqrt{R+B},$$

$$L_P = R - k\sqrt{R}\sqrt{1 + \frac{B}{R}} \quad \dots\dots\dots (17)$$

이다. 항상 $\frac{B}{R} < 1$ 이므로, t 는 근사적으로 $\sqrt{1 + \frac{B}{R}} \approx 1 + \frac{B}{2R}$ 이 된다.

만약 $S > L_P$ ($H_0: S > R$ 에서 H_0 는 참이다)일 때, 즉 시료의 측정치가 결정준위 이상이라면 그때 방사능 정량분석준위는 시료의 계수치보다 많음($L_M < u_S$)을 알 수 있다. 그러므로 그림 5에서 보

여준 것으로 다음의 관계를 만들 수 있다.

$$\text{즉 } L_M = L_P - k_\alpha \sigma_M, \quad L_M = L_P - k\sigma_M,$$

$$\sigma_M^2 = L_M + u_B = L_M + B \text{ 이다. 그러므로}$$

$$L_M = L_P - k\sqrt{L_M + B} \quad \dots\dots\dots (18)$$

만약 $L_M = L_P + B$, $L_P = L_P + B$, $R = R + B$ 이라 정의한다면, $L_M = L_P - k\sqrt{L_M}$ 이고, $L_P = R - k\sqrt{R}$ 이므로 $L_M = R$ 이 된다.

최적화 계측조건을 갖추기 위해서는 중간값의 개념을 도입 해보자. 이 때 자연계수치중에서 $r_{B_{MAX}}$ 와 r_B 는 동시에 발생하는 값이고 $r_{B_{\bar{}}}$ 는 평균값이며 $r_{B_{med}}$ 는 중간값이다. 그러므로 중간값으로 시간을 평가한다면 다음과 같다.

$$Y_{med} = \frac{r_{B_{med}}}{\epsilon A^*} \text{ 일때}$$

$$t_{med}^{II} = \frac{k^2}{\epsilon A^*} f(Y_{med}) \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$R_{S_{med}} = \frac{r_{S_{med}} + r_{B_{med}}}{r_{B_{med}}} \text{ 일때}$$

$$t_{med}^{III} = \frac{k^2}{r_{B_{med}}(R_{S_{med}} - 1)^2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

최적화 계측조건을 측정시간을 결정하기 위한 전략은 그림 5에서 보여준바와 같은 준위를 이용하여 다음과 같이 요약된다.

계측전략 I : 측정시간이 이용될 때, $L_M = CR$, $L_M < \text{참값} < R$ 이기 때문에 정량분석준위(L_M)은 설정되나 결정준위(L_P)에 접근한다. 기준준위(R)에서 정확도는 고정되어 있으므로, 정량한계(L_Q)는 양적으로 제한된 것으로 L_M 상에 있다. 따라서 $R = L_Q$ 가 된다.

계측전략 II : 측정값이 이용될 때, 즉 $H_0: S < R$ 에서 만약 H_0 가 참값이라면, $L_M = L_M^*$ 일 때까지 측정한다.

계측전략 III : 계측전략 II에서 만약 H_0 가 거짓이라면, $S < L_P$ 일 때까지 측정한다.

Table 4. Result of calculation for screening.

Scope	Method	Condition	Optimized counting time (sec)
Strategy I : $t^I = \frac{k^2}{r_D} f(Y), \quad Y = \frac{r_{B_{MAX}}}{\epsilon A^*}$	Fixed time ($r_{B_{MAX}}$)	5 s^{-1}	$t^I = 59.4$
Strategy II : $t^{II} = \frac{k^2}{r_D} f(Y), \quad Y = \frac{r_B}{\epsilon A^*}$	Fixed count (r_B)	1 cps	$t^{II} = 15.8$
Strategy III : $t^{III} = \frac{a^2 k^2}{4r_B(R_S - 1)^2},$ $R_S = \frac{r_{S+B}}{r_B}$	Compared background (r_S/r_B)	0.1	$t^{III} = 270.6$
		1	= 2.7
		10	= 0.03

최적 계측전략 이용 계산결과

방사능 존재확인시 측정시간 결정

방사능 존재확인시 자연방사선에 따라 최적측정 시간을 구할 수 있다. 측정조건에 따른 을 다음과 같은 조건으로 측정하였다면, 즉, $t_{MAX} = 2000$ sec, $\epsilon = 0.1$, $A_{D_{MAX}} = 10$ Bq ($A_C < 10$ Bq 임)이며 일반잡음은 $\dot{B} = 1$ cps 이다. 만약 $\dot{B} \geq 1$ cps 라면, 그것은 $\dot{B}_{MAX} = 5 \text{ s}^{-1}$ 로 정한다. 그리고 시료와 자연계수율의 비인 r_S/r_B 의 비값을 0.1, 1, 10으로 하여 비교하였을 때, 최적화 계측전략에 의한 측정시간인 t^I, t^{II}, t^{III} 을 계산하여 보면 다음과 같이 된다.

먼저 표 2에서 신뢰구간이 $\alpha = \beta = 0.05$ 일 때, $k = 1.645$, $t_{MAX} = 200$ sec, $\dot{B}_{MAX} = 5 \text{ s}^{-1}$, $A_{D_{MAX}} = 10$ Bq, $\epsilon = 0.1$, $L_{D_{MAX}} = 0.16585$, $A_{D_{min}} = 1.645$ Bq 이다.

그러므로 $A_{D_{min}} < A_{D_{MAX}}$ 이다.

또한 표 2에서 $R_{MAX} = 0.2$, $t_{max} = 59.4$ sec 이므로 $t_{max} < t_{MAX}$ 이며, $T = 739.1$, $\dot{B}_{max} = 184.3 \text{ s}^{-1}$ 이므로 $\dot{B}_{max} > \dot{B}_{MAX}$ 이다. 그러나 여기서 $\dot{B}_{max} > \dot{B}_{MAX}$ 인 것을 사용할 수 없다. 그

리므로 이 예의 결과는 $A_D = 10$ Bq, $\dot{B}_{MAX} = 5 \text{ s}^{-1}$, $t = t_{max} = 59.4$ sec이다. 즉 식(9)에서, $k = 1.645$, $r_D = \epsilon A^* = 1$, $Y = 5$, $f(Y) = 21.95$ 이므로 $t^I = 59.4$ sec이다. 식(10)에서, $r_B = 1 \text{ s}^{-1}$, $Y = 1$, $f(1) = 5.82$ 이므로 $t^{II} = 15.8$ sec이다.

또한 식(15)에서 r_S/r_B 의 값은 0.1, 1, 10이고 $r_B = 1$ 이다. 이것을 이용하여 표 4에는 각각의 r_S/r_B 에 따른 t^{III} 의 계산결과를 나타냈다.

이상과 같은 방법으로 방사능의 존재확인 은 주어진 자연방사선에 따라 최적측정시간을 결정했다. 따라서 이것은 앞으로 어떤 측정조건이든 자연방사선만 정해진다면 쉽게 최적측정시간을 구할 수 있게 된다.

방사능 정량분석시 측정시간 결정

방사능 정량분석시에는 기준준위를 기준으로 판단하여 최적시간을 결정하여야 한다. 기준준위와 다음과 같이 비례하는 조건으로 측정하였다면, 즉, 100 cm^2 면적으로 된 검출기로 측정하되, 기준준위(R)는 $r_R = 0.1 \text{ Bq/cm}^2$ 이고, 자연계수율(B)은 $r_{B_{max}} = 2.5 \text{ s}^{-1}$ 이고, 측정시간 $t = 0.2$ sec, $\epsilon = 0.1$, $A_{D_{MAX}} = 10$ Bq, $t_{MAX} = 2000$ sec, $r_{B_{MAX}} = 5$ cps 일 때, 시료와 기준의 비인 $\frac{r_{S_{max}}}{r_R} = 0.01, 0.1, 1$ 로 선정하였을 때, 최적화 계측전략에 의한 측정시간인 t^I, t^{II}, t^{III} 을 계산하여 보면 다음과 같이 된다.

Table 5. Result of calculation for monitoring.

Scope	Method	Condition	Optimized counting time (sec)
Strategy I : $t^I = \frac{k^2}{r_D} f(Y), \quad Y = \frac{r_{B_{MAX}}}{\epsilon A^*}$	Fixed time ($r_{B_{MAX}}$)	5 s^{-1}	$t^I = 59.4$
Strategy II : $t_{med}^{II} = \frac{k^2}{\epsilon A^*} f(Y_{med}), \quad Y_{med} = \frac{r_{B_{med}}}{\epsilon A^*}$	Fixed count ($r_{B_{med}}$)	2.5 cps	$t^{II} = 31.8$
Strategy III : $t_{med}^{III} = \frac{k^2}{r_{B_{med}}(R_{S_{med}} - 1)^2},$ $R_{S_{med}} = \frac{r_{S_{med}} + r_B}{r_B}$	Compared reference level ($r_{S_{med}}/r_R$)	0.01	$t_{med}^{III} = 676.4$
		0.1	= 6.7
		1	= 0.07

즉, 식(9)에서, $k = 1.645$, $r_D = \epsilon A^* = 1$, $Y = 5$, $f(Y) = 21.95$ 이므로 $t^I = 59.4 \text{ sec}$ 이다. 그리고 식(19)에서, $Y_{med} = 2.5$, $f(2.5) = 11.74$ 이므로 $t^{II} = 31.8 \text{ sec}$ 이다. 또한 식(20)에서 $r_R = 0.1$, $r_{B_{med}} = 2.5$ 이다. 이것을 이용하여 표 5에는 $r_{S_{med}}/r_R$ 에 따른 t^{III} 의 계산결과를 나타냈다.

이상과 같은 방법으로 방사능 정량분석은 기준 준위에 따라 최적측정시간이 결정되었다. 이것은 앞으로 또 다른 기준준위나 측정조건에 대해서도 쉽게 최적측정시간을 결정할 수 있다는 것이다.

결론

최적화된 측정조건으로 시료의 방사능을 측정하기 위하여 계측전략이 먼저 설정되어야 한다. 그러므로 이 논문에서는 방사능의 존재확인(screening)과 정량분석(monitring)시 3가지의 계측전략을 이용하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 계측전략 I은 측정시간을 이용할 때

$$t^I = \frac{k^2}{r_D} f(Y), \quad Y = \frac{r_{B_{MAX}}}{\epsilon A^*}$$

식을 도출하였으며,

2) 계측전략 II는 측정값을 이용할 때 자연계수율을 직접 이용하는 경우에는 $t^{II} = \frac{k^2}{r_D} f(Y)$,

$$Y = \frac{r_B}{\epsilon A^*}$$

와 중간값을 이용하는 경우에는

$t_{med}^{II} = \frac{k^2}{\epsilon A^*} f(Y_{med}), \quad Y_{med} = \frac{r_{B_{med}}}{\epsilon A^*}$ 식을 도출하였고,

3) 계측전략 III은 시료계수율과 자연계수율 또는 기준준위와 비교되어 결정되는 방법으로

$$t_{med}^{III} = \frac{a^2 k^2}{4 r_B (R_S - 1)^2}, \quad R_S = \frac{r_{S+B}}{r_B}$$

와 $t_{med}^{III} = \frac{k^2}{r_{B_{med}}(R_{S_{med}} - 1)^2}, \quad R_{S_{med}} = \frac{r_{S_{med}} + r_B}{r_B}$ 식을 도출하였다.

계측전략에서는 주어진 각기에 측정조건 및 관련되는 기준, 예를 들면 검출기의 효율, 계측기의 용량, 계측기의 최대 및 평균 자연계수율, 기준준위, 최소검출한계 등을 만족하면서 측정시간이 결정되었다.

즉 이 계측전략은 측정시 주어진 조건에서 시료의 방사능 존재확인 및 정량분석을 위한 최적화된 시간을 결정할 수 있어, 시료의 계측시간을 절약할 수 있다. 따라서 이 계측전략은 일상의 저준위 방사능 측정시 유용하게 사용될 것이다.

참고문헌

1. Currie L.A., Limits for Qualitative Detection and Quantitative Determination, *Anal.Chem.*, 40(3), 586-593(1968).
2. Roderick J.A.Little, Statistical Analysis of Low Radioactivity, *Health Physics*, 43(5), 693-703(1982).

3. Altschuler B. and Pasternak B., Statistical Analysis of Lower Limit of Detection of a Radioactivity Counter, *Health Physics*, 9, 293-298(1963).
4. Little R.J.A., Hypothesis Tests Based on Counts of Low-level Radioactivity from Blank and Sample Sources, *Health Physics*, 42(2), 230-231(1982).
5. Jack J.Donn and Robert L.Wolke, The Statistical Interpretation Counting Data from Measurements of Low-Level Radioactivity, *Health Physics*, 32, 1-14(1977).
6. F.M. Cox and C.F. Guenther, An industry survey of current lower limits detection for various radionuclides, *Health Physics*, 69(1), 121-129(1995).
7. Fong, Show H. and Alvarez, Joseph L, When is a lower limit of detection low enough ?, *Health Physics*, 72(2), 282-285(1997).
8. J. E. Turner, Atoms, *Radiation and Radiation Protection*, 2nd ed., Wiley, New York(1995).