

Response Matrix 에 의한 감마線 Spectrum 및

그 照射線量 解析

金 成 冠 · 田 載 植

忠南大學校 理科大學 物理學科

= 要 約 =

3'×3' 원통형 NaI(Tl) 검출기와 多重波高分析器를 사용하여 측정한 0.05~2.0 MeV 구간의 γ 선 spectrum 에서 實 spectrum 을 구하기 위하여 照射線量率산출에 편리한 response matrix 방법을 사용하였다.

Response matrix 구성에는, 위의 에비지 구간을 0.1 MeV 의 등간격으로 나눈 20×20 matrix 로 한것과 검출기의 분해능이 입사 γ 선 에너지의 平方根에 의존한다는 가정하에 $0.1(\text{MeV})^{1/2}$ 구간으로 나누어 14×14 matrix 로 구성한, 두가지 방법을 사용하였으며 그 逆 matrix 들은 P-E 82/32 콤퓨터 로 계산하였다.

이 방법으로 얻은 조사선량율은 에너지와 flux 가 알려진 γ 선場에 대하여 흔히 사용되는 계산방법 으로 구한값과 10% 이내에서 일치하고 있으며, 線量測定學的 견지에서는 $E^{1/2}$ 구간으로 형성된 matrix 가 등에너지간격으로 구성된 것보다 현실적인 것으로 판단되었다.

序 論

감마선 spectrometer 로 부터 얻은 波高 spectrum 은 감마선 에너지에 따르는 검출기 효율의 차이와 부분적으로 흡수된 光子들로부터 생긴 波高分布등에 의하여 실제의 spectrum 으로부터 벗어난다. Spectrometer 로 측정 한 波高 spectrum 을 해석하는 방법은 일반적으로 graphical analysis¹⁾와 linear least square fitting^{2,3)} 및 response matrix 방법^{4~15)} 등이 있다.

먼저 graphical analysis 방법으론 감마선에너지와 強度를 구하는데 많은 시간이 소비되며, 분석자의 주관적인 오차가 포함될 우려가 있다. 이 방법은 초기 분광학자들 사이에서 잠시 사용되었으며, 정확도가 그리 많이 요구되지 않는 기초실험에서는 아직도 널리 사용된다.

Linear least square fitting 방법은 복합적인 γ 선 spectrum 에서 여러 성분의 감마線들을 식별하고 그 線質을 조사하는데 많이 사용되나, 각 선원의 光電 peak 아래의 면적, 즉 強度를 정확히 구하는데 복잡한 과정¹⁶⁾이 수반된다.

다음으로 response matrix 방법은 환경방사선이나 전자의 制動輻射 spectrum 과 같은 연속적이거나 복합적인 감마선 spectrum 을 分析하여 에너지分布와 強度를 얻는데 유용하다. 특히 光子의 수를 쉽게 구할 수 있어 照射線量率을 측정하는데 용이하다.

Response matrix 方法을 사용한 예로는 Starfelt 와 Koch⁷⁾가 10 MeV 까지를 망라하는 56×56 matrix 로 2.7 MeV~9.7 MeV 의 전자들에 의해 발생하는 thin-target 制動輻射의 散亂斷面積을 측정하였고, Hubbell, Hayward 와 Titus¹⁷⁾는 8 MeV 까지 포함하는 28×28 matrix 를 사용하여 4''두께의 납을 투과하여 산란된 X-선의 에너지와 角分布를 측정하였으며 Minato 와 Kawano¹⁰⁾는 지표감마선을 측정하기 위하여 3 MeV 까지의 범위에서 30×30 matrix 로 照射線量率을 구하고, 電離函으로 측정 한 값과 비교하여 좋은 결과를 얻었다. 최근에도 Minato^{13,14)}가 환경 γ 선 해석용 3'' ϕ ×3'' NaI(Tl)검출기의 22×22 matrix 를 3.2 MeV 까지 망라하게 만들고, 이를 이용하여 低準位漏洩 감마선량을 계산하였다.

본 연구는 3'' ϕ ×3''NaI(Tl)검출기와 1,024채널 多重波高分析器(MCA)를 사용하여 0~2 MeV 에너지 범

위의 γ 선이 NaI(Tl)결정의 축방향으로 入射할 때, NaI(Tl)검출기의 response를 나타내는 14×14 matrix와 20×20 matrix를 Hubbell과 Scofield가 수행한 방법^{4,8)}을 사용하여 구성하였다. 여기서 14×14 matrix는 $0.1(\text{MeV})^{1/2}$ 의 等根平方에너지 구간으로 구성하였고^{4,8)}, 20×20 matrix는 0.1 MeV 의 等에너지 구간으로^{5,6,10,13)} 구성하였다. 즉 14×14 matrix는 $E^{1/2} = 0.1 (\text{MeV})^{1/2} \sim 1.4 (\text{MeV})^{1/2}$, $E = 0.01 \text{ MeV} \sim 1.96 \text{ MeV}$ 범위를 망라하고, 20×20 matrix는 $0.1 \text{ MeV} \sim 2 \text{ MeV}$ 범위를 망라하도록 구성하였다.

이 두 matrix를 사용하여 단일에너지 γ 선의 에너지 spectrum과 조사선량을 구하였으며, 그 결과를 비교하였다.

II. Spectrum의 分析方法

감마선 분광분석기로 측정된 파고 spectrum은 단일에너지 감마선의 불연속적인 set이거나 制動輻射線과 같은 감마선 continuum이나 이들의 조합으로 구성된 감마선 spectrum의 검출결과로 얻어지는 것이다. 측정된 파고 spectrum을 분석하는 방법들은 앞에서 언급한 바와같이 graphical analysis와 linear least square fitting 및 response matrix method 등 세가지로 들 수 있는데, 비교를 위하여 그 내용을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

1. 減算에 의한 Graphical Analysis

여러개의 핵종들을 함유한 γ 선원을 측정된 혼합파고 spectrum의 점들을 조사하여, 가장 높은 에너지에 해당하는 光電 peak를 찾아서 그것을 본래의 spectrum에서 減算한 다음 減算된 혼합파고 spectrum의 점들을 다시 조사한다. 이와같은 과정을 차차 낮은 에너지의 γ 선에 대하여 遂次的으로 수행하여 혼합파고 spectrum을 분석하는 방법이다.

이 방법은 다소 주관적이며 結果의 정확도는 spectrum에 있는 감마선의 數와 그들의 상대적 강도와 분석자의 기술에 크게 좌우된다. 分析이 진행될 때 측정되는 오차를 最少化하기 위해 fitting과정에서 세심한 주의가 필요하다. 또 이 방법은 spectrometer의 에너지 對 파고 response에 관한 지식이 먼저 설정되어야 하며, 分析하는데 많은 時間이 소비된다. 오차의 계산은 매우 주관적이며, 정확도는 많은 실험적 요인들에 크게 좌우된다. 그러나 좋은 점은 結果가 理論적으로 誤差를 포함하지 않고 分析者가 분석과정에서 오차를 구할 수 있다는 점이다.

2. Linear Least Square Fitting

이 방법은 光電 peak가 뚜렷이 나타나는 불연속적인 spectrum의 분석에 적합하며, 컴퓨터 사용자에게 의해서 프로그램될 수 있고, 많은 종류의 데이터분석에 응용한다.

핵종 j 의 표준선원에 대한 채널 i 의 계수율을 a_{ij} , 혼합물에 대한 채널 i 의 계수율을 b_i , 핵종 j 의 표준 방사능에 대한 미지방사능의 비를 x_j 라하면,

$$b_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} x_j + z_i \tag{1}$$

라 쓸 수 있다. 여기서 z_i 는 채널계수율에서의 random error이고 m 은 핵종의 수이다. x_j 의 최상값은 $\epsilon (=z_i)$ 의 제곱의 和)을 최소화시킴으로 얻을 수 있다. 즉,

$$\epsilon = \sum_{i=1}^n z_i^2 = \sum_{i=1}^n \left(b_i - \sum_{j=1}^m a_{ij} x_j \right)^2 w_i \tag{2}$$

가 되는데 여기서 w_i 는 가중치이며 n 은 channel 수이다. ϵ 을 최소화하기 위해서는 x_j 에 대해 편미분하고, 방정식을 0으로 놓는다. 그러면 다음과 같은 선형연립 방정식을 얻게 된다.

$$\sum_{j=1}^m x_j \sum_{i=1}^n a_{ik} a_{ij} = \sum_{i=1}^n a_{ik} b_i \tag{3}$$

이 방법은 主觀的인 오차를 배제하며, spectrum 分析時 fitting의 程度를 계산할 수 있다. 단점은 분석되는 혼합 spectrum에 포함되어 있는 γ 線源들의 數를 알아야 하고, 그 선원들 각각의 에너지에 대한 검출기 response를 나타내는 표준 spectrum들이 준비되어야 하는 점이다.

3. Response Matrix Method

Response matrix 방법은 파고 분석기의 각 채널간의 중앙점에 대응하는 γ 선들의 선형합이 波高 spectrum이 되고, 그 γ 선들에 대한 검출기의 response spectrum이 준비된다고 가정하면, 미지의 波高 spectrum에서 여러 감마선들의 에너지와 強度를 구할 수 있다. Matrix 표현으로 각 채널의 중앙점에 대응하는 감마선들에 대한 검출기의 response를 나타내는 spectrum들의 배열은 $n \times n$ matrix R 에 대응한다. 여기서 n 은 분석기의 채널수이다. 만일 實驗的으로 얻은 spectrum이 column matrix X 로 표시된다면

$$RY = X \tag{4}$$

로 쓸 수 있다. 여기서 Y 는 spectrum에서 감마선들의 미지의 강도를 나타낸다. 이 방정식의 response matrix R 의 역을 취하여

$$Y = R^{-1}X \tag{5}$$

의 식에 의해 Y값을 얻는다.

이 방법은 연속적이거나 복합적인 γ 선 spectrum 해석에 적합하며, 구간당 光子의 수를 쉽게 구할수 있어 조사선량율을 알아내는 데 좋은 方法이 된다. 그러나 측정된 spectrum 이 smooth하게 변하지 않는 단일에너지 γ 선 spectrum에서는 계수의 통계적 오차때문에 심한 요동을 발생케하여 에너지분포를 보기에는 좋지 못하다.

이상 3가지 方法中 본 研究에서는 측정된 γ 선 spectrum을 해석하고 조사선량율을 구하기 위하여 光子의 수를 쉽게 얻을 수 있는 세번째 方法인 response matrix 方法을 채택하였다.

實 驗

1. 實驗裝置 및 그 補正

본 실험에 使用한 器機는 3"×3"φ 원통형 NaI(Tl) 섬광검출기와 ORTEC 6240 B 1024 channel의 다중파고분석기(MCA) 및 이에 부수되는 증폭기와 직류고압 공급기로 구성되어 있다. 검출기의 분해능(FWHM)은 실측에 의하면 0.662 MeV에서 7%이고, 512채널사용시 채널당 에너지가 3.9 keV/ch 정도였다. 한편, 이 spectrometer의 입사감마선에너지에 대한 출력파고의 교정을 위하여 방출 감마선의 에너지가 잘 알려진, ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{54}Mn 및 ^{60}Co 등 6개의 소형 표준선원을 사용하였다.

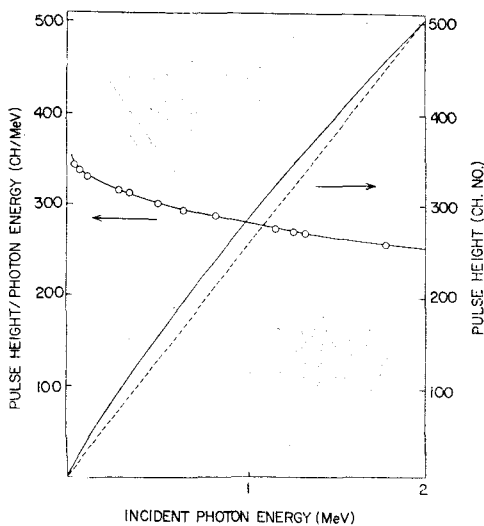


Fig. 1. Observed non-linear relationship between output pulse height and incident photon energy.

Table 1. Steps in the Numerical Evaluation of the Response Matrix from the Interpolated Distributions, $R(E', E_i)$, and Its Use in Transforming a Pulse Height Distribution, $S(E')$, into a Photon Number Spectrum, $N(E)^{4)}$.

$$R_{ij} = \int_{E_{j-1}}^{E_j} R(E', E_i) dE' \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n R_{ij} = \epsilon \left(\frac{E_i - E_{i-1}}{2} \right) \quad (\text{normalization}) \quad (7)$$

$$N_i = \int_{E_{i-1}}^{E_i} N(E) dE \quad (\text{photons/bin}) \quad (8)$$

$$S_j = \int_{E_{j-1}}^{E_j} S(E') dE' \quad (\text{counts/bin}) \quad (9)$$

$$S_j = N_i R_{ij} \quad (\text{folding}) \quad (10)$$

$$S_j R'_{j-1} = N_i R_{ij} R_{ij}^{-1}, \quad \text{or} \quad (11)$$

$$N_i = S_j R_{ij}^{-1} \quad (\text{unfolding}) \quad (12)$$

$$N(E) \cong \frac{N_i}{E_i - E_{i-1}} \quad (\text{photons/MeV}) \quad (13)$$

입사 감마선의 에너지와 출력파고의 直線性을 알아 보기 위하여 단위에너지당 출력파고(P/E, ch/MeV)의 값을 입사감마선의 에너지의 함수로 구하여 보았는데 (Fig. 1참조), 0.05 MeV에서 345 ch/MeV인 것이 2 MeV에서는 262 ch/MeV로 되어 앞의 것이 뒤의 것 보다 무려 75%나 커서 직선성이 상당히 부족한 것으로 나타났다. 이미 이 에너지 영역에서 단위에너지당 출력 파고의 값이 20~25%정도로 차이가 나는 비직선성은 Engelkemeir¹⁸⁾, Managan and Crouthamel¹⁹⁾ 및 Zerby²⁰⁾에 의하여 실험과 이론적으로 연구지적된 바 있는데, 그 주된 이유는 scintillator에 入射하는 감마선의 에너지가 증가함에 따라 에너지가 큰 전자들이 발생되고, 이에 따라 비전리, dE/dr가 증가되는데, 이렇게되면 전자경로 근처에 activator center들이 포화상태를 이루어 結果적으로 섬광효율이 감소되기 때문인 것으로 證明하는가 하면²¹⁾, 전리 및 여기분자의 밀도가 큰 경우의 일차 여기에서 전리자체가 quenching되기 때문으로 설명되기도 한다²²⁾.

그러나 이와같은 현상은 비교적 저에너지 영역에서 볼 수 있는 것이며, 우리가 현재 사용한 spectrometer의 비직선성은 MCA의 A-D converter의 적분직선성이 저하된 탓으로 보인다. 이에 대한 보정을 하기 위하여 0.1 MeV 구간마다 그 지점의 단위에너지당 출력파고값에, 해당에너지를 곱하여 그 에너지에 대응되는 출력파고를 산출하여 감마선 에너지 對 출력파고의 graph를 Fig. 1과 같이 재현하였다. 이것으로 측정된 spectrum의 에너지를 결정하였다.

Table 2. Response Function Matrix

$(E)^{1/2}$ $E^{1/2}$.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
.1	1,000	990												
.2	10	990												
.3	7	28	960											
.4	4	24	63	839										
.5	5	11	26	65	743									
.6	8	23	37	51	68	600								
.7	7	19	33	46	71	64	473							
.8	7	18	28	39	62	64	60	372						
.9	6	15	25	33	49	60	65	69	323					
1.0	5	12	20	27	38	48	52	58	71	289				
1.1	4	10	15	20	30	39	42	45	63	75	219			
1.2	3	9	14	17	27	33	37	39	48	69	70	144		
1.3	3	9	12	15	24	28	30	31	37	41	56	67	135	
1.4	2	7	11	13	20	22	25	27	27	34	36	53	67	120

$E^{1/2}$ represents the top of the photon energy interval(MeV), $(E')^{1/2}$ is the energy corresponding to the top of the pulse-height interval(MeV). To yield the matrix elements the numbers in the table should be multiplied by 10^{-3} .

2. Response Matrix 構成

본 研究에서는 response matrix 구성의 두가지 다른 接近方法을 취하였는데, 그 하나는 入射감마선 에너지를 0.1 MeV의 등간격으로 나누어 20×20 matrix를 만든 것이고, 다른 하나는 器機의 에너지 분해능이 $E^{1/2}$ 에 비례한다²³⁾는 가정하에 $0.1(\text{MeV})^{1/2}$ 의 等平方 에너지 간격의 14×14 matrix를 만든 것이다. 다음은 Table 1에 있는 것과 같이 matrix의 구성과 사용에 관한 기본적인 단계를 거친다⁴⁾.

(6)식은 E_i 가 에너지구간의 중앙값이고, E' 이 波高 spectrum에서 E_i 에 대응되는 채널일 때 내삽된 response spectrum $R(E', E_i)$ 를 정해진 간격으로 나누는 다음 그 Bin 내의 면적을 구하는 식이다. Bin의 면적인 R_{ij} (i 는 감마선에너지, j 는 파고)의 배열을 얻기 위해선 적분이나 수치계를 사용해 계산한다. (7)식은 i 번째 에너지에 대해 모든 j 값들의 합이 결정의 감마선 검출효율이 됨을 보여준다. (8)식과 (9)식처럼 N_i 와 S_j 가 정의되면 서로의 관계는 (10)식으로 表現된다. (10)식, (11)식, (12)식은 folding과 unfolding 과정을 나타내며, (13)식은 각 에너지구간에 대한 $N(E)$ 의 평균값을 얻기 위해 (8)식의 양쪽을 미분한 것이다.

3. 照射線量率 計算

입사광자 spectrum이 결정되면 조사선량율은 다음 식¹⁰⁾으로 계산된다.

$$\dot{X} = 1.72 \frac{\sum_i E_i \cdot n_i \cdot \mu_i \cdot L}{V \cdot W \cdot t} \cdot \Delta E \quad (14)$$

여기서 \dot{X} : 조사선량율($\mu\text{R/hr}$)

E_i : 입사광자에너지(MeV)

n_i : 입사광자수($n/\Delta E$ MeV)

μ_i : 공기의 에너지 흡수계수(cm^{-1})

L : NaI 결정의 유효길이(cm)

V : NaI 결정의 체적(cm^3)

W : 공기의 W 값(MeV/ion pair)

t : 측정시간(sec)

ΔE : 에너지 간격(MeV)

유효길이 L 은 $3''\phi \times 3''\text{NaI(Tl)}$ 결정체의 표면에서 측상으로 10 cm 떨어진 점선원으로 부터 isotropic하게 방출된 광자들이 결정체를 통과하는 경로의 평균길이이다.

結果 및 考察

본 실험에서 얻어진 2 MeV 이하의 감마선에 대한 검출기의 response matrix R 은 Table 2 및 Table 4와

Table 3. Inverse Response Function Matrix

$(E')^{1/2}$ $E^{1/2}$.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
.1	1000													
.2	-10	1010												
.3	-7	-29	1042											
.4	-4	-27	-78	1192										
.5	-6	-12	-30	-104	1346									
.6	-11	-33	-54	-89	-153	1667								
.7	-11	-30	-53	-88	-181	-226	2114							
.8	-13	-31	-47	-78	-169	-250	-341	2688						
.9	-9	-21	-37	-55	-103	-211	-353	-574	3096					
1.0	-7	-13	-24	-38	-60	-134	-225	-398	-761	3460				
1.1	-4	-11	-12	-17	-38	-96	-157	-251	-630	-1185	4566			
1.2	-1	-12	-18	-12	-44	-75	-149	-224	-361	-1082	-2220	6944		
1.3	-5	-18	-13	-18	-45	-63	-87	-124	-177	-22	-793	-3447	7407	
1.4	2	-4	-16	-16	-25	-20	-59	-120	-34	-135	-53	-1143	-4136	8333

$E^{1/2}$ represents the top of the photon energy interval(MeV), $(E')^{1/2}$ is the energy corresponding to the top of the pulse-height interval(MeV). To yield the matrix elements the numbers in the table should be multiplied by 10^{-3} .

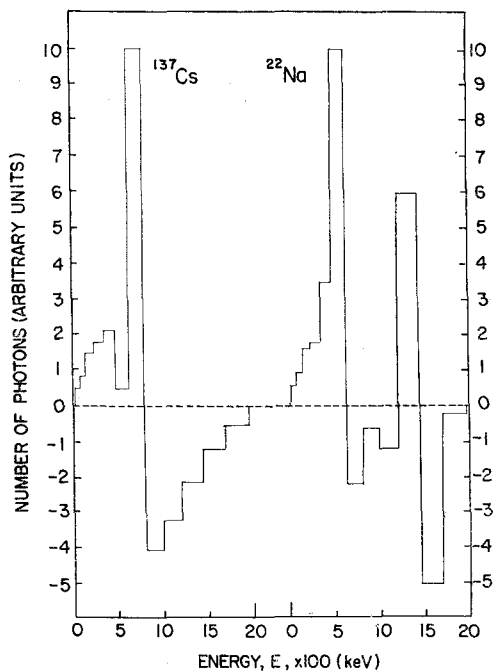


Fig. 2. Response corrected spectra for gamma-rays of ^{137}Cs and ^{22}Na (using 14×14 matrix)

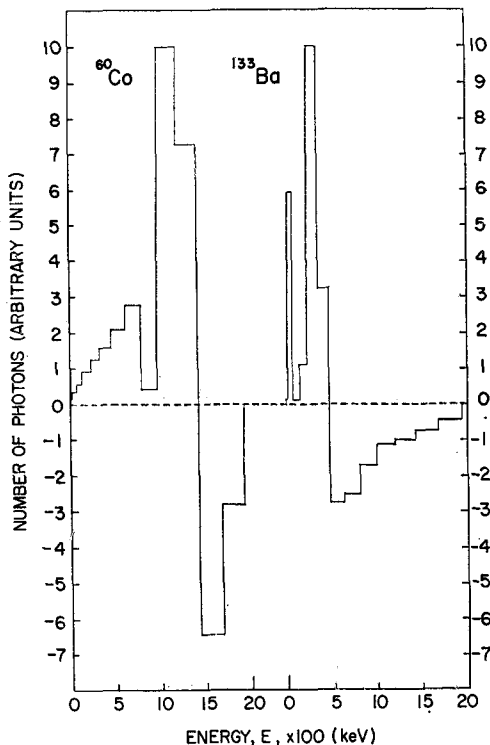


Fig. 3. Response corrected spectra for gamma-rays of ^{60}Co and ^{133}Ba (using 14×14 matrix)

Table 4. Response Function Matrix

$E' \setminus E$	50	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	1150	1250	1350	1450	1550	1650	1750	1850	1950	
50	960	40																			
150	40	860	20																		
250	50	84	715	21																	
350	60	80	60	634	16																
450	55	78	73	33	500	11															
550	44	70	73	55	17	388	9														
650	40	69	70	61	50	12	344	7													
750	40	62	65	56	57	43	20	289	12												
850	44	58	63	50	45	53	36	25	255	18											
950	34	46	54	44	43	44	51	29	26	255	19										
1050	31	39	46	39	38	38	39	47	28	29	189	17									
1150	26	34	39	34	32	32	34	38	43	22	30	177	14								
1250	21	30	34	29	28	27	79	33	39	37	17	30	149	16							
1350	19	26	32	28	25	24	25	29	34	33	36	18	32	135	17						
1450	17	25	30	24	25	23	22	25	29	30	29	31	16	33	118	22	1				
1550	17	24	28	23	21	22	21	22	23	25	29	27	28	16	33	107	23	1			
1650	16	23	26	22	20	18	21	18	18	21	24	28	25	27	16	34	100	25	1		
1750	16	22	25	21	18	17	16	18	17	18	19	21	26	25	26	16	35	93	26	1	
1850	16	21	24	20	17	16	16	16	18	17	16	17	20	25	22	24	16	36	81	28	
1950	15	21	23	20	17	16	16	16	17	17	16	17	19	20	25	22	23	20	41	78	

E represents the center of the photon energy interval(keV), E' is the energy corresponding to the center of the pulse-height interval(keV). To yield the matrix elements the numbers in the table should be multiplied by 10^{-3} .

Table 5. Inverse Response Function Matrix

$E' \setminus E$	50	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	1150	1250	1350	1450	1550	1650	1750	1850	1950	
50	1044	-49	1																		
150	-47	1169	-33	1																	
250	-65	-130	1406	-47	1																
350	-84	-127	-124	1584	-51	1															
450	-91	-146	-187	-93	2005	-57	1														
550	-30	-153	-228	-206	-75	2581	-68	2													
650	-66	-151	-219	-246	-273	-75	2913	-71	3												
750	-65	-124	-192	-223	-346	-349	-178	3478	-165	13	-1										
850	-85	-106	-177	-174	-241	-457	-341	-308	3966	-321	33	-3									
950	-46	-53	-124	-128	-211	-357	-553	-337	-403	4532	-463	45	-4	1							
1050	-42	-28	-84	-98	-159	-269	-383	-711	-417	-623	5434	-530	51	-6	1						
1150	-22	-17	-47	-67	-96	-159	-279	-465	-756	-315	-854	5821	-561	69	-11	2					
1250	-4	-15	-29	-38	-68	-91	-181	-395	-653	-850	-222	-1095	6989	-858	131	-29	6	-1			
1350	0	2	-30	-49	-30	-36	-81	-212	-461	-554	-1111	-248	-1579	7866	-1202	263	-52	11	-4	1	
1450	6	-11	-33	-15	-78	-54	-45	-139	-300	-522	-525	-1091	-121	-2087	9306	-2033	406	-97	31	-10	
1550	-11	-18	-36	32	-16	-87	-43	-76	-104	-250	-712	-503	-1317	-3	-2750	10686	-2644	665	-216	-69	
1650	-11	-28	-36	-39	-54	-24	-136	40	69	-132	-261	-795	-469	-1476	213	-3495	11942	-3549	1184	-379	
1750	-23	-32	-47	-53	-28	-54	20	-79	59	18	-125	-118	-953	-417	-1885	575	-4424	13568	-5148	1674	
1850	-31	-23	-47	-38	-35	-30	-72	-19	-127	-52	74	-117	-67	-1190	-67	-2104	1104	-5631	17234	-6115	
1950	-14	-31	-26	-52	-35	-53	-50	-76	-59	-75	-56	-21	-357	16	-1473	-434	-2339	368	-8036	15701	

E' denotes the center of the photon energy interval(keV), E is the energy corresponding to the center of the pulse-height interval(keV). To yield the matrix elements the numbers in the table should be multiplied by 10^{-3} .

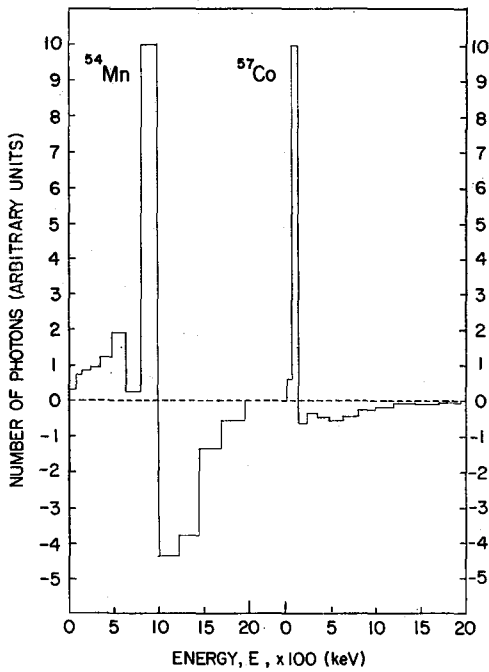


Fig. 4. Response corrected spectra for gamma-rays of ^{54}Mn and ^{57}Co (using 14×14 matrix)

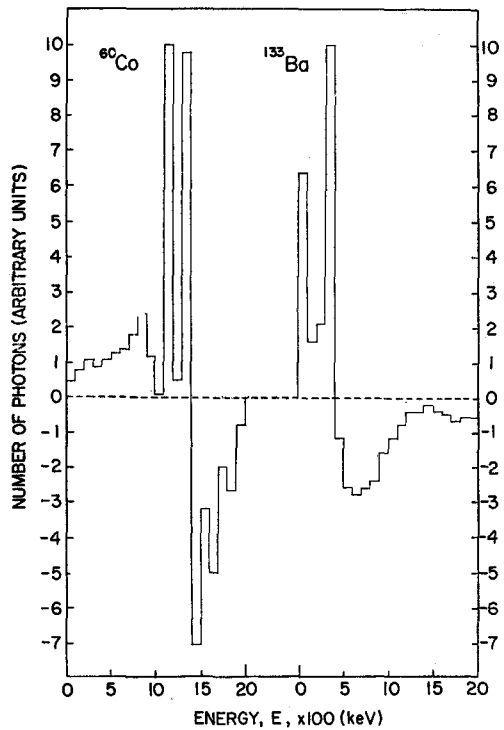


Fig. 6. Response corrected spectra for gamma-rays of ^{60}Co and ^{135}Ba (using 20×20 matrix)

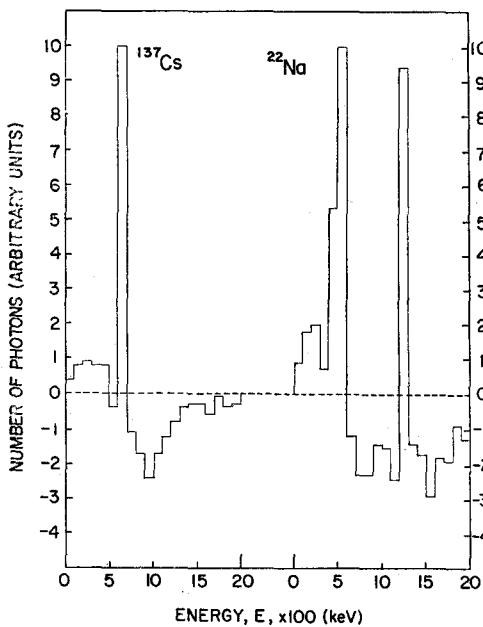


Fig. 5. Response corrected spectra for gamma-rays of ^{137}Cs and ^{22}Na (using 20×20 matrix)

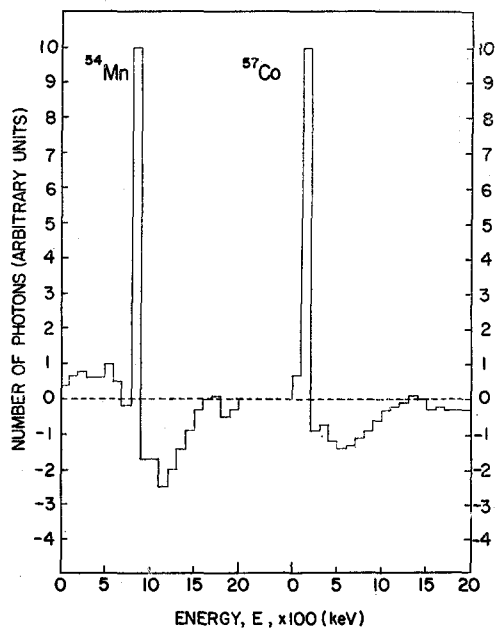


Fig. 7. Response corrected spectra for gamma-rays of ^{54}Mn and ^{57}Co (using 20×20 matrix)

Table 6. Photopeak Height of Response Corrected Spectra

Source	Energy(MeV)	Matrix	
		14×14	20×20
¹³⁷ Cs	0.662	3,570	9,430
²² Na	0.511	3,425	3,984
	1.274	1,321	3,739
⁶⁰ Co	1.173	2,783	5,552
	1.332	1,850	5,435
¹³³ Ba	0.08	8,217	4,302
	0.256	6,289	6,716
⁵⁴ Mn	0.835	126	274
⁵⁷ Co	0.122	290	193

Table 7. Comparison of Exposure Rates(R/hr) Between Those Obtained by Calculation and Response Matrix Method.

Source	Dose Rate(R/hr)		
	20×20	14×14	Cal
¹³⁷ Cs	269.0±0.4	299.7±0.4	268.4
²² Na	300.7±0.5	297.6±0.5	305.9
⁶⁰ Co	644.2±0.9	605.0±0.9	630.3
¹³³ Ba	119.4±0.1	134.9±0.2	134.3
⁵⁴ Mn	10.4±0.1	10.2±0.1	10.5
⁵⁷ Co	1.0±0.0	0.8±0.0	0.7

같으며, 이에 대한 inverse response matrix R^{-1} 은 computer(P·E 8/32)를 사용하여 구했는데, 이때 사용한 computer program은 부록에 첨부하였다. Table 3과 Table 5가 얻어진 inverse response matrix R^{-1} 이다. 여기서 matrix의 어떤 열의 모든 요소들의 합은 入射光子당 출력파수를 나타내므로 結晶效率과 같다. 그러므로 대각선상의 값들은 光子의 全에너지가 출력펄스로 생산되는 入射光子數들의 fraction이 된다.

단일에너지 γ 선에 의한 파고 spectrum을 inverse response matrix R^{-1} 로 교정한 response corrected spectrum들中 14×14 matrix를 사용한 것은 Fig. 2~Fig. 4이며, 20×20 matrix를 사용한 것은 Fig. 5~Fig. 7이다. 이 모든 그림들은 corrected spectrum의 모양을 비교하기 위하여 각 光電 peak의 높이를 10으로 규격화한 것이며, 照射線量계산에는 실제의 corrected value를 사용하였다. 각 光電 peak의 실제 높

이를 계수치로 나타낸 것은 Table 6과 같다. 이들 계수치를 보면 그 차이가 큰 것을 알 수 있으나, 조사선량계산에는 peak의 높이 뿐 아니라 그 peak가 점유하는 면적 전체의 계수치를 쓰는 것이므로 실제로 이와 같이 큰 차이가 나는 것은 아니다. 이 두경우의 교정된 spectrum을 보면, 양쪽 모두 에너지가 증가됨에 따라 동요가 심해지는데 그 이유는 smooth response spectrum들을 histogram으로 표시함에 따라 생긴, 적은 편차와 측정된 파고 spectrum에서 생기는 계수의 통계적 fluctuation에 의한 것^{4,8,10}으로 설명되고 있다. 이런 點에서 보면 단일에너지의 감마선 spectrum 분석에는 이 방법이 적합치 못한 것으로 생각된다. 그러나 환경방사선과 制動輻射線 spectrum 등과같이 평평하고 연속적이거나 복잡한 에너지 분포를 갖는 spectrum을 分析하는 데는 유용한 것으로 알려지고 있다.^{8,10,14}.

(14)식으로 구한 각 선원들에 대한 조사선량율은 Table 7과 같다. 여기서 식(14)의 L, V 및 W 값은 각각 6.9 cm, 347.3 cm³, 33.88 eV¹⁰을 사용하였다. Table 7의 계산된 照射線量率은 다음 식²⁴으로 구하였다.

즉,

$$\dot{X} = 2.765 \times 10^4 \frac{fE\mu}{4\pi d^2 \rho} \quad (15)$$

\dot{X} : 조사선량율(R/hr/Ci)

f : 붕괴당광자방출율(photons/dis.)

E : 광자의 에너지(MeV/photon)

μ : 공기의 에너지 흡수계수(cm⁻¹)

d : 선원으로 부터의 거리(cm)

ρ : 공기의 밀도(1.293×10⁻³g/cm³)

이 값과 matrix方法을 사용한 값의 차이는 10%미만이다. 그리고 오차의 범위는 계수율의 표준편차²⁵만을 고려했을 때, ±1 μR/hr 이내로 1%미만이다.

또 14×14 matrix와 20×20 matrix의 값을 비교하면, 14×14 matrix를 사용했을 경우 ¹³³Ba의 조사선량율이 20×20 matrix의 값보다 계산값에 더 가까움을 보이고 있는데, 그 이유는 14×14 matrix의 에너지구간을 $E^{1/2} = 0.1(\text{MeV})^{1/2}$ 의 등 평방근간격으로 하였을 때 생략되기 쉬운 低에너지에서의 光子들이 포함²⁵되기 때문으로 생각된다. 그리고 高에너지에서의 搖動은 실제 선량의 계산에는 심각한 영향을 미치지 않는 것¹⁰으로 해석된다. 그러므로 2 MeV 이하의 범위에서는 등平方根에너지 간격을 사용하는 것이 좋은 것으로 판단된다.

結 論

Inverse response matrix 方法을 통하여 감마線分
光分析器로 부터 얻은 波高 spectrum 을 real photon
spectrum 으로 바꾸고, 또 이를 가지고 照射線量率을
계산하였는 바, 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. Inverse response matrix 方法은 環境放射線이
나 制動輻射線 spectrum 과 같이 연속적이거나 複合
的인 7선 spectrum 의 分析에 유용하나, 단일에너지
7선과 같이 날카로운 peak 를 가지는 spectrum 解析
時에는 높은 에너지 부분에서 나타나는 搖動때문에 바
랍직하지 못한 方法임을 확인하였다.

2. 이 方法을 통해 얻은 照射線量率은 계측오차만을
생각한다면 1%미만에서 얻을 수 있었으며, 이 값들은
이론값과 10%미만의 차이를 보이는 좋은 일치를 이
룬다.

3. Response matrix 구성시 에너지 구간을 등간격
의 Bin 으로 나눈 것보다는 에너지 제곱근에 uniform
한 간격으로 나눈 것이 線量率계산에 보다 타당성이
있는 것으로 판단되었다.

參 考 文 獻

- 1) R.E. Connally: Anal. Chem. 8:1847, 1956.
- 2) L. Salmon: Nucl. Instr. Meth. 14:13, 1961.
- 3) R.L. Heath: Nucleonics 20(5):67, 1962.
- 4) J.H. Hubbell and N.E. Scofield: I.R.E. Trans. Nucl. Sci. NS-55:16, 1958.
- 5) E.G. Rawson and D.V. Cormack: Nucleonics 16(10):92, 1958.
- 6) T. Hyodo and F. Makino: Mem. Fac Eng. Kyoto Univ., 24:291, 1962.
- 7) N. Starfelt and H.W. Koch: Phys. Rev. 102:

- 1598, 1956.
- 8) J.H. Hubbell: Rev. Sci. Instr. 29:65, 1958.
- 9) J. Kockum and N. Starfelt: Nucl. Instr. Meth. 4:171, 1959.
- 10) S. Minato and M. Kawano: J. Nucl. Sci. Tech. 7:401, 1970.
- 11) K. Shin et al.: J. Nucl. Sci. Tech. 16:390, 1979.
- 12) 申島敬行, 湊 進, 川野 實, 桂山幸典: 日本原子力學會誌 12:574, 1977.
- 13) 湊進: 名古屋工業技術試驗所報告 27:384, 1978.
- 14) 松田秀晴, 古川滋子, 上西時司, 湊 進: 名古屋工業技術試驗所報告 31:132, 1982.
- 15) D.T. Ingersoll and B.W. Wehring: Nucl. Instr. Meth. 147:551, 1977.
- 16) R.L. Heath: Nucl. Instr. Meth. 43:209, 1966.
- 17) J.H. Hubbell et al.: Phys. Rev. 108:1361, 1957.
- 18) Engelkemeir: Rev. Sci. Instr. 27:589, 1956.
- 19) F. Adams and R. Dams: Applied Gamma-Ray Spectrometry, pp.55, Pergamon Press, New York, 1976.
- 20) C.D. Zerby, A. Meyer and R.B. Murray: Nucl. Instr. Meth. 12:115, 1961.
- 21) R.B. Murray and A. Meyer: Phys. Rev. 122: 815, 1961.
- 22) D. Blanc, F. Cambon and Y.G. de Lafond: CR Acad. Sci. Pan's 254:3187, 1962.
- 23) J.W. Motz: Phys. Rev. 100:1560, 1955.
- 24) H. Cember: Introduction to Health Physics, Ch. 6, Pergamon Press, Oxford, 1969.
- 25) W.J. Price: Nuclear Radiation Detector, Ch. 3, McGraw-Hill, New York, 1964.

附錄 : Matrix Inversion Program

```

10 HOME:PRINT TAB(12) "MATRIX INVER-
   SION"
15 POKE 34,1
20 PRINT
40 READ R: REM DIMENSION OF MATRIX
50 DIM A(R,R), B(R,R)
60 DIM B1(R,R)
70 FOR J=1 TO R
90 FOR I=1 TO R
110 READ A(J,I): REM INPUT ELEMENT
115 R1(J,I)=A(J,I)
120 NEXT I
130 B(J,J)=1
140 NEXT J

```

```

145 HOME: PRINT "INVERT MATRIX: ":PRI-
    NT: FOR I=1 TO R: FOR J=1 TO R: PR-
    INT A(I,J);I" ";NEXT J: PRINT: NEXT
    I: PRNT: PRINT "ANSWER IS:":PRINT
390 B(L,K)=B(L,K)+T*B(J,K)
400 NEXT K
410 NEXT L,J
430 PRINT
440 FOR I=1 TO L
445 PRINT "(";I;";";
450 FOR J=1 TO R
460 PRINT INT(B(I,J)*10^6+.5);" ";
470 NEXT J
480 PRINT " ":PRINT " "
490 NEXT I
900 PRINT: PRINT: PRINT
998 PRINT "MATRIX*INVERSION--->UNI-
    TARY MATRIX": PRINT
999 REM TEST OF OPERATION
1000 FOR I=1 TO R
1010 FOR J=1 TO R
1020 S=0
1030 FOR K=1 TO R
1040 S=S+B1(I,K)*B(K,J)
1050 NEXT K
1060 PRINTINT (S*1000+.5)/1000;" ";
1070 NEXT J
1080 PRINT
1090 NEXT I
1100 END
150 FOR J=1 TO R
160 FOR I=J TO R
170 IF A(I,J)<> 0 THEN 210
180 NEXT I
190 PRINT "SINGULAR MATRIX"
200 TEXT: END
210 FOR K=1 TO R
220 S=A(J,K)
230 A(J,K)=A(I,K)
240 A(I,K)=S
250 S=B(J,K)
260 B(J,K)=B(I,K)
270 B(I,K)=S
280 NEXT K
290 T=1/A(J,J)
300 FOR K=1 TO R
310 A(J,K)=T*A(J,K)
320 B(J,K)=T*B(J,K)
330 NEXT K
340 FOR L=1 TO R
350 IF L=J THEN 410
360 T=-A(L,J)
370 FOR K=1 TO R
380 A(L,K)=A(L,K)+T*A(J,K)

```

Analysis of Gamma-ray Spectrum and Assessment of Corresponding Exposure Rate by Means of Response Matrix Method

Seong-Kwan Kim and Jae-Shik Jun

Department of Physics, Chungnam National University, Daejeon, Korea

=Abstract=

A study has been carried out for figuring out real photon spectrum from an observed gamma-ray spectrum by means of response matrix method, which is known one of the relatively convenient method for the estimation of exposure rate of a complex gamma ray field in comparison with graphical analysis and least square fitting of the measured spectrum.

A 3''×3'' cylindrical NaI(Tl) scintillation detector in association with multichannel pulse height analyzer and six reference gamma ray sources covering the photon energy

range of 0.05 to 2.0 MeV were used.

In dividing the energy region for the construction of response matrix, two different approaches were attempted. One is dividing the entire energy region of interest into 20 bins, one of which corresponds to a width of 0.1 MeV to form 20×20 matrix, and another is dividing the 2 MeV region into 14 bins to form 14×14 matrix consists of $0.1(\text{MeV})^{1/2}$ intervals assuming the resolution of the detector is dependent on square root of the incident photon energy. Inversion of thus constructed matrices was performed by a computer (P-E8/32) using the program attached to the end of this paper.

The resultant exposure rates obtained by this method were in good agreement, within 10% with those calculated by ordinary formula widely used for a gamma-ray field of known energy and flux. It is concluded that the photon flux obtained by the response matrix constructed under the assumption of $E^{1/2}$ dependence is more realistic than that obtained by the matrix consist of identical energy bins in dosimetical point of view.