

## 감마선 및 엑스선의 피이크 분석

한국에너지연구소

김승곤\* · 허영희 · 박광준

### 要 約

核分裂 및 放射化生成物에서 放出하는 여러가지 감마선들은 核燃料를 破壞하지 않고도 抽出할 수 있는 많은 情報를 包含한다. 그러나 半導體 檢出器에서 얻은 복잡한 스펙트럼에서 이러한 정보를 抽出하기가 容易하지 않기 때문에 電算코드의 使用이 必要하게 된다.

本 研究에서는 그동안 國際的으로 널리 普及되어 使用되는 감마선 分析 프로그램들의 長點을 취하여, 감마선은 물론 X-線의 스펙트럼도 피팅(fitting)하여 피이크의 중심과 면적을 正確히 計算할 수 있는 전산코드 CAERI를 開發하였다.

CAERI는 FORTRAN으로 쓰여있고, 특히 固有輻射線幅(natural line width)을 무시할 수 없는 X-線의 피이크 表現函數인 Voigt 函數에 대해서는, 다른 X-線 分析 프로그램들이 使用한 간단한 近似式 대신에, 더욱 正確한 無限級數近似式을 使用하였다.

특히 CAERI는 U이나 Pu과 같은 重元素의 核種分析時에 直面하는 감마선과 U이나 Pu의 X-線이 任意로 干涉하며 共存하는 복잡한 스펙트럼까지도 取扱할 수 있다.

<sup>177m</sup>Lu감마선과 <sup>235</sup>U K $\alpha$ X-線의 試驗스펙트럼을 피팅하여, 다른 프로그램들의 피팅결과와 비교했을 때 좋은 一致를 보였다.

### 序 論

照射된 核燃料는 많은 감마선들과 X-線들을 방출한다. 감마선은 核分裂 및 中性子 放射化 生成物에서 방출되고 X-線은 우라늄이나 플루토늄과 같은 重元素에서 軌道電子의 捕獲崩壞(electron capture decay), 內部轉換에 이어 발생한다.

照射核燃料에 대한 감마스펙트럼 分析은 핵연료의 性能評價와 物理的 模型確認을 하는데 있어서, 신속하고도 경제적이고 또 편리한 非破壞的인 檢査方法으로 많이 사용되고 있다.

照射된 核燃料棒에서 얻은 감마스펙트럼으로부터 여러가지 核分裂生成物들과 放射化生成物들의 局所的 絕對量, 放射能 및 軸方向의 분포를 精確히 결정하기 위해서는, 컴퓨터 프로그램을 사용하여 감마선 피이크의 중심과 면적을 精確하게 구하는 것이 先行되어야 한다.

피이크의 중심과 면적은 각각 에너지補正과 效率補

正을 거쳐 에너지와 강도로 환산되며 이 情報는 核種 判別과 核種별 放射能의 결정에 필요불가결하다.

半導體 檢出器에서 얻은 高分解性 감마선 스펙트럼의 電算分析을 위한 코드들이 그동안 국제 학술문헌에 많이 보고되어 왔다. 이들중 대부분은 計器反應의 幅에 비해서 固有輻射線幅(natural line width)을 무시할 수 있는 감마선의 피이크 피팅에 局限되었고, 固有輻射線幅을 감안해야 되는 X-線 피이크 피팅을 위해서는 計器反應인 가우시언(Gaussian)과 本然의 X-線 모양인 로렌치언(Lorentzian)과의 卷积루션(convolution)인 Voigt profile에 대한 區分的 近似를 利用한 몇가지 프로그램들이 별도로 개발되었다.

그런데 여기에 使用된 Voigt profile의 近似式들은 계산하는데 편리하고 빠른 長點이 있었으나 근사식의 有效條件과 精確성에 한계가 있었으므로, 本 研究에서는 피팅대상의 스펙트럼 피이크群이 전부 감마선이건, 혹은 전부 X-線이건 혹은 감마선과 X-線이 임의의 方法으로 간섭하여 共存하는 가장 일반적인 경우의 스펙트럼까지도 피팅할 수 있는, 용도가 더 다양한 프로그램을 개발하였다. Voigt profile의 계산은 無限級數近

\* 전북대학교

似式을 사용하여 다른 研究者들 보다 더 精確하게 계산하였다.

### 理論的 背景

#### 1. 피이크에 대한 線形的 數學的 表現

감마스펙트럼 分析에서 피이크의 에너지와 강도를 精確하게 결정하기 위해 꼭 필요한 것은 피이크에 대한 線形的 精確한 表現이다. Ge(Li)나 Si(Li) 檢出器로부터 얻는 이상적인 檢出器反應은 무시할 만큼 작은 幅을 가지겠지만, 실제로는 이러한 이상적인 反應을 여러가지로 변형시키고 동시에 폭을 넓히는 要因들이 존재한다. 주어진 에너지가 흡수되었을때, 生成된 hole electron-pair의 總數는 이온화 과정과 結晶格子의 加熱間에 생기는 임의의 에너지 損失分配로 인한 統計的 搖動(statistical fluctuation)을 받게 된다.

만일 生成된 電荷캐리어의 평균수가 E/e이면, 檢출기에 생긴 hole electron-pair數에 대한 統計的 搖動의 標準偏差는  $\sigma = (FE/e)^{1/2}$ 로 주어지는데, 여기서 E는 檢출기에 흡수된 에너지이고 e는 hole electron-pair를 生成하는데 요하는 평균에너지로 檢출기의 質에 관계된다. F는 파노因子(Fano factor)<sup>1,2)</sup>라고 부르는 量으로, 이온화 數에서 관측된 平均自乘搖動과 이온화 數에 대한 비로 定義된다. 이 결과는 檢출기 反應의 broadening을 일으키는데 에너지의 散布로 인해서 가우시언 分布의 形을 갖게한다. hole electron-pair數의 요동을 에너지 散布 ΔE, 즉, 에너지 스펙트럼에서 가우시언形 피이크의 半值全幅으로 환산하면  $\Delta E = 2.355(eFE)^{1/2}$ 이 된다.

그런데 檢출기 漏泄電流로 인한 잡음과 관련된 檢出裝置의 電子雜音이 원인이 되는 broadening으로 가우시언의 幅은 더욱 넓어진다. 또한 불안정한 電荷集束과 측정 때문에 가우시언 모양은 낮은 에너지의 꼬리(low energy tail) 부분에서 변형된다. 이러한 변형은 전자캐리어들의 再結合, 檢출기의 敏感한 부분에 존재하는 不純物이나 結晶質의 결함과 같은 結晶體안의 trapping center 그리고 檢출기 신호에 아무런 기여도 하지않고 탈출하는 光電子들 때문에 더욱 증가한다. 이상과 같이 檢출기 신호를 修正하는 여러 효과 때문에, 單一光子 피이크는 修正된 가우시언, 즉, 非對稱이나 指數函數的 꼬리를 한 가우시언으로 表現되거나,<sup>3-6)</sup> 순수한 가우시언에 修正하는 函수를 더한 形으로 表現되거나,<sup>7,8)</sup> 가우시언과 변형을 나타내는 적합

한 函수와 의 곱 또는 卷积(convolution)으로 表現된다.<sup>9,10)</sup> 그러나 스펙트럼에서 光子 피이크는 때로는 피이크 영역에서 檢출기 反應의 강도와 비교할만한 강도를 가질 수 있는 背景放射能(background)과 항상共存하게 된다. 에너지에 따른 背景放射능의 變化는 적당한 次數의 多項式과 피이크 채널 근방의 背景放射능에 step을 넣어 表現할 수 있는데, 이때 이 step은 피이크 자신이 生成한 낮은 에너지쪽까지 연장된다. Ge(Li)와 Si(Li) 檢출기로부터의 피이크를 나타내는 여러가지의 解析的 表現들이 사용되고 있는 반면,<sup>3-13)</sup> 최근에 變形效果를 기술하는 꼬리함수(tailing function)를 순수한 가우시언에 더하여 만든 函수의 媒介變數들을 最適化하였을 때 종전의 線形函數에 현저한 진보를 이룩했다고 報告된바 있다.

#### 2. 새로이 채택된 函數形

Ciftcioglu<sup>14)</sup>에 의하면, 背景放射能의 表現에 m次 多項式을 채택하고 step effect에는 Jorch와 Campbell<sup>15)</sup>이 제안한대로 피이크 가우시언의 幅과 동일한 width parameter를 가진 誤差函數(error function)를 쓰고 기타 다른 成分을 고려하여 다음과 같은 函數形을 案出하였다.

$$F(x) = \sum_{k=1}^{m+1} a_k x^{k-1} + \sum_{j=1}^n \left[ h_j \operatorname{erfc} \left( \frac{x-x_{oj}}{\sigma_g} \right) + A_{tj} \exp \left\{ B(x-x_{oj}) \right\} \times \left[ 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{2} \times \left( \frac{x-Cx_{oj}}{\sigma_t} \right)^2 \right\} \right] \delta + A_{gj} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{x-x_{oj}}{\sigma_g} \right)^2 \right\} \right] \dots \dots \dots (1)$$

여기서 n은 선정한 피이크群내에 있는 피이크의 數이고, h<sub>j</sub>는 j번째 피이크의 step의 높이, A<sub>tj</sub>는 j번째 피이크의 꼬리 函수의 係數, A<sub>gj</sub>는 j번째 피이크에 대한 가우시언의 높이이다. σ<sub>g</sub>는 가우시언의 幅과 관계된 量이고 x<sub>oj</sub>는 j번째 피이크의 가우시언의 최대가 되는 x의 값이며, B는 가우시언의 강도에 포함되어서 指數함수적으로 崩壞하는 부분을 결정한다. σ는 Dirac function으로서 x < Cx<sub>o</sub>에 대해서는 1의 값을 취하며, x ≥ Cx<sub>o</sub>에 대해서는 0의 값을 취한다. C는 피팅을 向上시키기 위해서 導入되었으며 σ<sub>t</sub>는 꼬리함수를 記述하는 하나의 媒介變數이다.

그런데 Ciftcioglu<sup>14)</sup>는 피팅하는 光子 피이크群내의 모든 가우시언 피이크는 同一한 幅을 갖는다고 假定한 때 反하여, 本 研究에서는 幅이 에너지에 따라 증가하는 일반적인 경우를 고려하여 피이크群內의 모든 가우

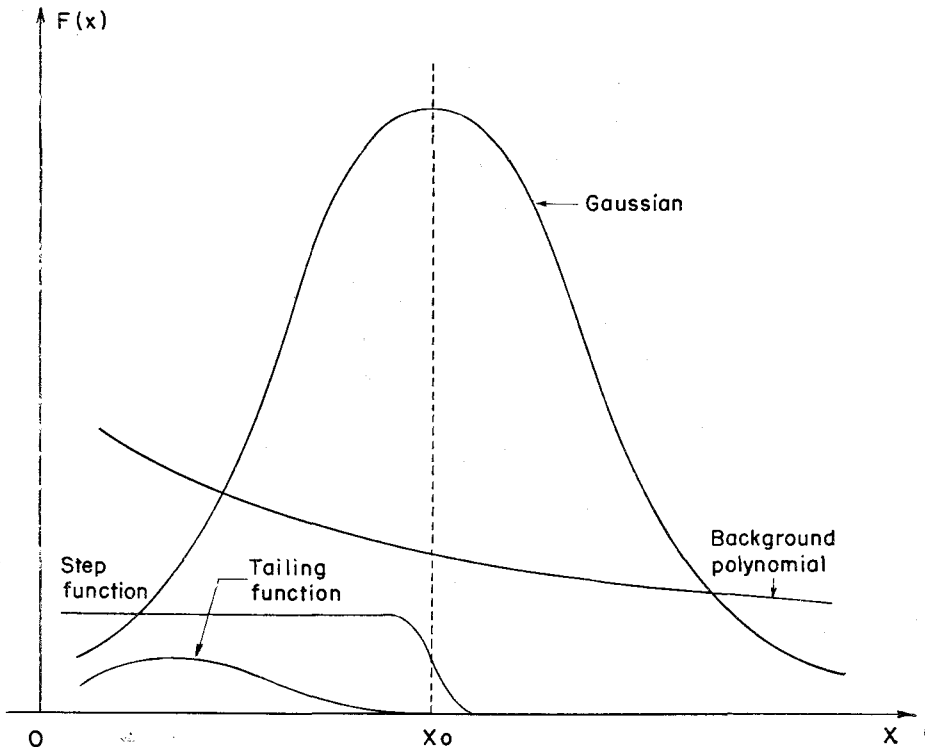


Fig.1. Schematic representation of the functional form of a photopeak.

시언이 각각 다른 폭을 갖도록 修正하고, (1)式的 두 번째  $\Sigma$ 記號안에 있는 둘째 項을 배경가우시언으로 代置하였다. 그리고 배경가우시언에 포함된 세개의 매개 변수가 피이크 가우시언의 매개 변수들과 서로 독립적으로 변할 수 있도록 修正하였다.

뿐만아니라 光子 피이크를 가우시언으로 近似表現하는 것은 스펙트럼선의 固有輻射線幅이 計器線幅에 비해 무시할 정도로 작은 경우에만 有効하기 때문에 이러한 制限에 관계없이 가장 일반적인 경우를 취급할 수 있도록, 피팅하는 피이크의 종류에 따라 가우시언이나 보익시언(Voigtian)을 임의로 선정할 수 있도록 하였다. Fig. 1은 光子 피이크의 函數의 形態를 圖示한 것이다.

### 3. 콘벌루션 積分(convolution integral)

두 函數 로렌치언  $L(x)$ 와 가우시언  $G(x)$  콘벌루션을 나타내는 식은.

$$C(x) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x)G(X-x)dx \dots\dots\dots(2)$$

이다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 out-put plane에서의

어느점  $X_1$ 에서의 合成信號  $C(X_1)$ 은  $X_1$ 에 존재하는 各個 重疊寄與(overlapping contribution)의 모두를 線形重疊(linear superposition)한 것이다.

다시 말하면, 각 線源要素  $dx$ 는 제각기 특유한 세기를 가진 신호  $L(x)dx$ 를 주는데, 이것이 가우시언 影像點( $X=x$ ) 근방에 중심을 둔 영역으로 가우시언系에 의해서 번지게 된다. 따라서  $X_1$ 에서의 出力은  $dC(X_1) = L(x)G(X_1-x)dx$ 이며, 積分은 각 線源要素로부터의 이러한 寄與를 모두 합하게 된다.

### 4. 光子 피이크를 피팅하는 方法

非線型最小自乘法(nonlinear least-squares method)에 의한 解析方法에서는, 감마스펙트럼의 한 領域에 있는 資料點들이 한변의 媒介變數  $P_k$ 에 종속하는 하나의 函數  $F_i$ 로서 표시될 수 있다고 假定한다.

최소자승 피팅의 목적은 理論의 函數와 資料間의 偏差의 자승의 和를 최소로 하는 매개 변수들의 값을 발견하는 데 있다. 즉,

$$\chi^2 = \sum_i W_i [F_i - \hat{F}_i(P_k)]^2 \dots\dots\dots(3)$$

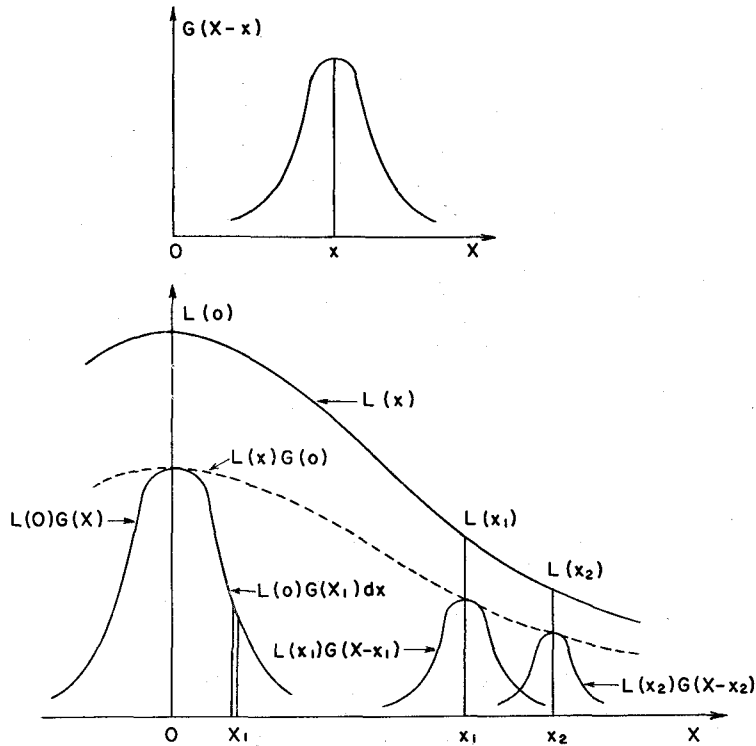


Fig. 2. The overlapping of weighted spread functions

이 최소로 되어야 한다.

여기서  $F_i$ 는 實驗資料點들이고,  $W_i$ 는  $F_i$ 에 대한 加量值(weight)이며,  $F_i(P_k)$ 는 자료를 나타내기 위해서 사용한 한벌의 매개변수  $P_k$ 의 함수로부터 계산한 값들이다.

합산은 피팅에 사용되는 모든 資料點들에 대해 이루어진다.  $P_k$ 의 함수로서  $\chi^2$ 이 최소로 되기 위한 必要充分條件은  $d\chi^2/dP_k=0$ 이 모든  $k$ 의 값에 대해 동시에 成立하는 것이다. 만일  $\bar{F}$ 가 매개변수  $P_k$ 의 線型函數라면, 각 매개변수의 最適值에 대한 식들이 유도될 수 있는데, 이것은 線型最小自乘 문제이다. 그런데, 여기서 취급되는 함수는 매개변수에 대한 非線型이므로, 명백한 解가 존재하지 않는다. 따라서 이 경우에는 線型化方法을 사용하여 해결할 수 있다. 이 방법에서는 切斷된 Taylor 級數를 사용하여 한벌의 매개변수들  $\delta P_k$ 에 대해, 주어진 함수를 線型化하는 것이다. 매개변수들

의 最初 어림값들  $P_{0k}$ 가 展開式에 있는 導函數의 값들을 계산하기 위해서 주어져야 한다.

즉,  $P_k = P_{0k} + \delta P_k$ 이라면,

$$\bar{F}_i(P_k) = \bar{F}_i(P_{0k}) + \sum_k (\partial \bar{F}_i / \partial P_k) \delta P_k + \text{高次도함수} \dots \dots \dots (4)$$

가 되는데, 여기서 도함수들은 매개변수들의 最初 어림값들을 써서 계산된다. 2次 以上の 모든 高次도함수들을 무시하면, 함수  $\bar{F}_i(P_k)$ 는  $\delta P_k$ 의 線型함수이다. 그러면,

$$(\chi')^2 = \sum_i W_i [F_i - \bar{F}_i(P_{0k}) - \sum_k (\partial \bar{F}_i / \partial P_k) \delta P_k]^2 \dots \dots \dots (5)$$

最小值를 결정하는 조건들은,

$$d(\chi')^2 / d(\delta P_k) = 0 \dots \dots \dots (6)$$

으로부터 주어지며 매개변수  $P_k$ 와 같은 數의 方程式들이 생긴다. 이 연립방정식의 解는 行列記號를 사용하

면 간결한 형태로 나타낼 수 있다.

각 매개변수에 요망되는 變化量을 벡터  $\Delta P=(\delta P_1, \delta P_2, \delta P_3, \dots\dots\dots)$ 로 定義하고 벡터  $B$ 를 다음과 같이 定義하기로 한다.

$$B = [\sum_i W_i (F_i - \bar{F}_i) (\partial \bar{F}_i / \partial P_1), \sum_i W_i (F_i - \bar{F}_i) (\partial \bar{F}_i / \partial P_2), \dots\dots\dots] \quad (7)$$

그러면  $SP_j$ 의 係數들은 다음의 要素들을 가진 對稱行列로 표시된다. 즉,

$$C_{ik} = \sum_i W_i (\partial \bar{F}_i / \partial P_i) (\partial \bar{F}_i / \partial P_k)$$

결국 연립방정식은  $C\Delta P = B$ 라고 쓸 수 있는데, 여기서  $\Delta P$ 와  $B$ 는 column vector이다.

따라서 解는  $\Delta P = AB$ 가 되며 새로운 行列  $A$ 는  $C^{-1}$ 과 같다. 高次도함수들이 무시되었기 때문에 이 節次는 방정식  $dX^2/dP_k = 0$ 의 解를 주지 못한다. 그러므로 방정식 (6)은  $P^o_k$ 를  $(P^o_k + \delta P_k)$ 로 置換하여 다시 풀어야 한다. 이 과정은 모든  $\delta P_k$ 의 값들이 미리 정해 놓은 收斂基準보다 작아지게 될 때까지 反復遂行된다. 이러한 收斂基準  $\Delta_k$ 는 모든  $k$ 에 대해  $\delta P_k \leq \Delta_k$ 가 동시에 만족되면 반복과정을 중지시키며, 이때 주어진 피이크에 대한 fitting process는 終了된다.

매개변수들이 최종 값들이 결정된 후에는 이 매개변수들에 대한 어림오차  $\sigma_k$ 가 계산되어야 한다. 統計理論에 의하면,

$$\sigma_k = [\{X^2 / (n - m)\} A_{kk}]^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

이 성립하는데, 여기서  $A_{kk}$ 는 行列  $A$ 의 對角線要素이고  $n$ 은 資料點의 數,  $m$ 은 獨立의으로 變換 수 있는 매개변수의 數,  $(n - m)$ 은 自由度의 數인데,  $X^2$ 은 最終의으로 결정된 매개변수들을 써서 계산된 값이다.

### 프로그램의 概要와 試驗스펙트럼 電算피팅 結果 比較

#### 1. 프로그램의 概要

이 프로그램은 main program과 7개의 부속된 subroutine으로 구성되어 있다. Main program은 스펙트럼, 피팅할 영역의 처음 채널과 마지막 채널번호, 이 영역內에 포함된 피이크의 數, 각 피이크와 배경의 形態, 그리고 피팅에서 결정한 매개변수들에 대한 최초 어림값들을 모두 入力파일에서 읽은 후 매개변수들의 값을 더욱 정확하게 보정하기 위해, 필요한 보정량들을 未知數로 하는 연립방정식을 풀게 되는데, 이에 앞서 피팅영역에 각 채널에서 선정된 배경함수의 값, 피

이크 함수의 값 및 이 함수들의 합의 각 매개변수에 대한 도함수들을 각각 subroutine BACKFN, SPLINE 및 DERTV에서 계산한다.

이때 피이크 函數가 보익시언일 때는 subroutine RWIW에서 필요한 函數를 計算하고 誤差函數는 Function ERFX에서 計算한다. 다음에는 subroutine MATINV에서 주어진 매트릭스를 反轉하여 逆매트릭스를 구한 후, 각 매개변수에 더해 줄 補正量들을 main program에서 계산한다. 미리 정해 놓은 收斂基準이 만족되지 않으면 만족될 때까지 이 과정을 반복하다가 그래도 만일 指定된 反復回數 안에 收斂이 되지 않으면 收斂失敗라는 기록을 남기고 일단 끝내지만, 既定反復回數내에 수렴이 되면, 각 매개변수에 대한 誤差, 각 피이크의 면적 및 이에 대한 오차, 그리고  $X^2$ 등을 기록하고 스펙트럼과 피팅결과를 요망하는 형태로서 line-printer로 圖示한 후 1회의 피팅이 終了된다. 프로그램의 flow chart는 Fig. 3과 같다.

#### 2. 試驗스펙트럼 電算피팅 結果 比較

完成된 우리의 프로그램 CAERI를 試驗하고 또 다른 研究者들이 開發한 프로그램들에 의하여 피팅된 結果와 대조하기 위해서  $^{177m}\text{Lu}$  시험스펙트럼으로부터 세계의 감마선 피이크를 선택하여 피팅한 結果를 Table 1에 서로 비교하였다.

세계의 피이크는 위에서부터 305.490, 258.758 및 228.452KeV의 감마선이고 Centroid와 FWHM은 모두 채널단위이다.  $X^2_R$ 은 규격화된  $X^2$ 이고, CAASA<sup>14)</sup>와 CAERI로 계산한 면적은 가우시언의 면적과 tail의 면적을 합한 것인데, tail에 CAASA의 경우에는 非對稱함수를, CAERI의 경우에는 對稱가우시언 함수를 사용하였다.

CAERI의 Centroid 값이 다른 세계의 平均值보다 약 0.8~0.9채널이 작지만, 補正線(calibration line)의 중심도 마찬가지로 일률적인 差異가 생기므로 각 중심의 값을 에너지로 換算하면 에너지 값에서의 差異는 거의 없어지게 된다.

CAERI의 結果가  $X^2_R$ 의 값으로 보아 SPAN<sup>3)</sup>이나 SAMPO<sup>4)</sup>보다는 더 좋은 피팅임을 나타내고, 면적의 값들도 모두 좋은 一致를 보여준다.

다음에는 보익시언 함수를 사용하는 피팅을 試驗하기 위하여,  $^{235}\text{Np}$ 이 輻射線을 捕獲한 후 生成된 우라늄 原子가 崩壞하여 放出하는  $K_{\alpha 1}$ 과  $K_{\alpha 2}$  X-線을 Ge(Li) 檢出器로 計測한 스펙트럼을 CAERI로 피팅한

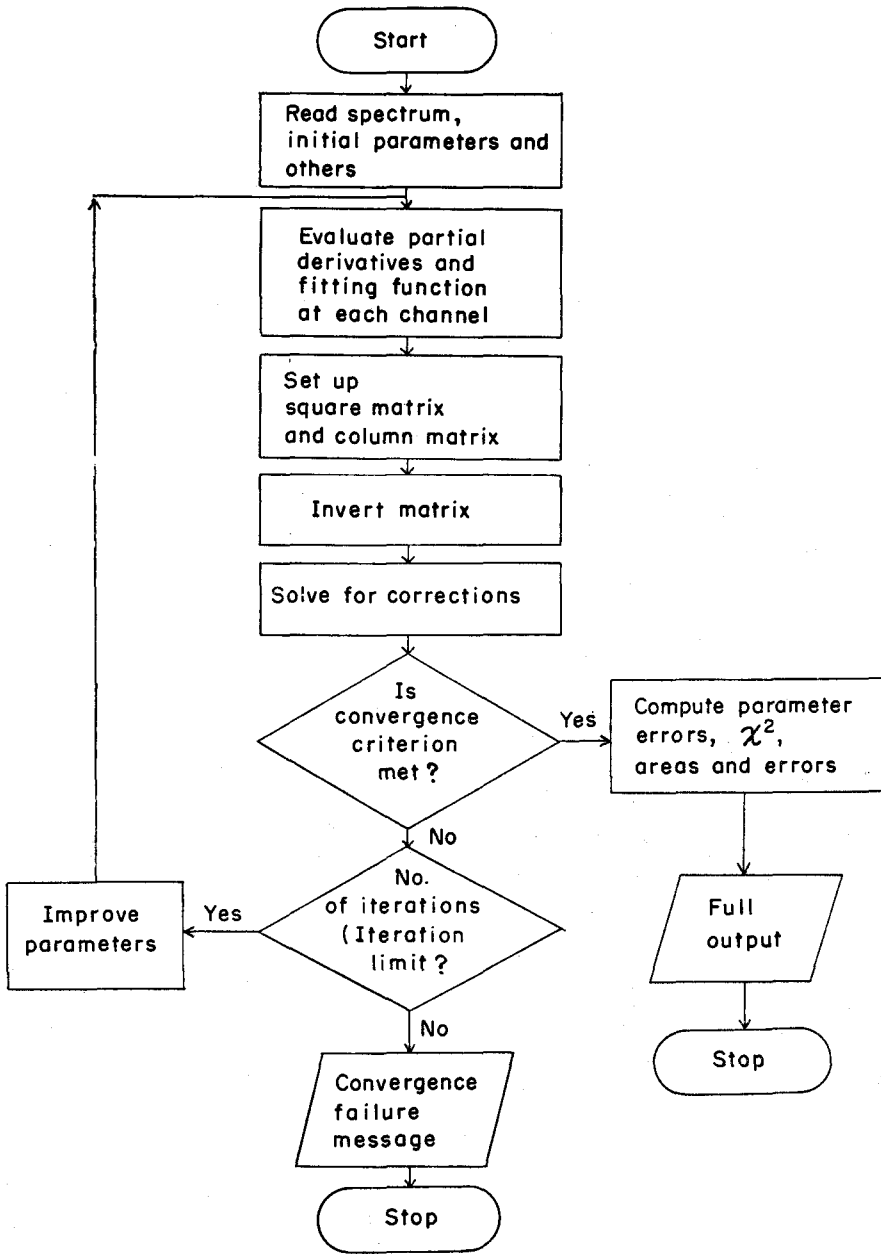


Fig. 3. Flow chart of the spectral peak fitting program CAERI.

결과와 Gunnink의 피팅결과<sup>18)</sup>를 표 2에 비교하였다.

Gunnink는 로렌치언 FWHM의 값을 고정해 놓고 피팅을 한듯한 인상을 주는데, CAERI의 피팅에서는 가우시언과 로렌치언의 FWHM을 각각 독립적으로 구

해 했으며 모든 變數의 誤差까지 계산했음을 볼 수 있다.

두 X-線 K<sub>a2</sub>와 K<sub>a1</sub>의 에너지가 각각 94.649KeV와 98.422KeV이므로 채널당 에너지는 0.0784KeV이다. 따

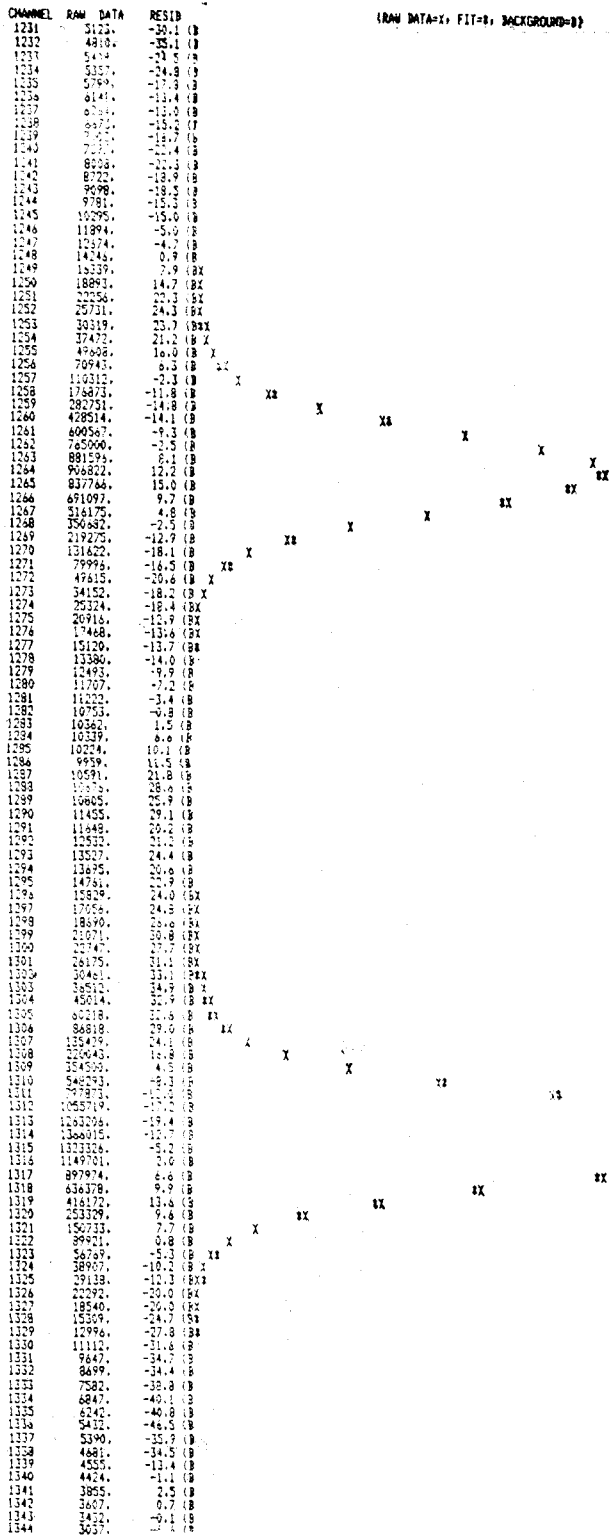


Fig. 4. Printout of U K<sub>α</sub> X-ray doublet peak fitting.

**Table 1.** Comparison of the results of three peaks from the test spectrum of  $^{177m}\text{Lu}$  by SPAN<sup>8)</sup> SAMPO<sup>9)</sup>, CAASA<sup>10)</sup>, and the present code CAERI.

Program	Centroid	FWHM	$X^2_R$	Area	Area of the tail	
SPAN	990.982	5.59	0.638	$2.5799 \times 10^4$		
SAMPO	990.887	5.75	0.859	$2.6077 \times 10^4$		
CAASA	960.922	5.75	0.909	$2.5446 \times 10^4$	$2.3054 \times 10^4$	$2.392 \times 10^3$
CAERI	$990.023 \pm 0.42$	$5.58 \pm 0.7$	0.566	$2.6018 \times 10^4$	$2.3574 \times 10^4 \pm 288$	$2.444 \times 10^3$
SPAN	852.942	5.43	1.827	$6.4610 \times 10^4$		
SAMPO	852.870	5.55	2.112	$6.4931 \times 10^4$		
CAASA	852.839	5.50	1.126	$6.4381 \times 10^4$	$5.8137 \times 10^4$	$6.244 \times 10^3$
CAERI	$852.095 \pm 0.21$	$5.32 \pm 0.5$	1.585	$6.4452 \times 10^4$	$5.7726 \times 10^4 \pm 467$	$6.726 \times 10^3$
SPAN	701.683	5.32	3.864	$1.0631 \times 10^6$		
SAMPO	701.649	5.83	9.153	$1.0642 \times 10^6$		
CAASA	701.712	5.35	2.470	$1.0699 \times 10^6$	$0.9957 \times 10^6$	$7.4181 \times 10^4$
CAERI	$700.704 \pm 0.11$	$5.30 \pm 0.2$	3.604	$1.0647 \times 10^6$	$1.0164 \times 10^6 \pm 13794$	$4.8347 \times 10^4$

**Table 2.** Comparison of the results of  $^{235}\text{U}$   $K\alpha$  X-ray peaks by Gunnink's code and the present code CAERI.

Program	Centroid	Gaussian FWHM	Lorentzian FWHM		Area
Gunnink	1263.762	6.331			
CAERI	$1263.725 \pm 0.28$	$6.47 \pm 0.4$	$1.43 \pm 0.1$		$7.484667 \times 10^6 \pm 61707$
Gunnink	1314.217	9.419			
CAERI	$1314.154 \pm 0.22$	$6.43 \pm 0.4$	$1.35 \pm 0.1$		$1.136684 \times 10^7 \pm 75242$

라서  $K_{\alpha 2}$ 와  $K_{\alpha 1}$ 의 로렌치언 FWHM의 값은 각각 106.9eV와 100.9eV이다.

피팅에서 결정하는 변수가 너무 많아지면, 밀접한 상관관계가 있는 변수들이 잘 수렴하지 않고 또 피팅 시간도 길어지게 되어, 이 피팅에서는 배경을 나타내는 데 간단한 1차 함수를 사용하였다. Fig.4는 U  $K_{\alpha}$  X-ray doublet peak의 피팅 결과이다.

### 結 論

本 研究에서 開發된 CAERI는 照射核燃料의 정밀 감마스캐닝에서와 같이 半導體 檢出器에서 얻는 스펙트럼의 감마선 光子 피이크는 물론, 電子 X-線 以外에도 원자핵에도 포획된 다른 粒子들( $\pi^-$ ,  $K^-$ ,  $\bar{P}$  등)이 핵과의 강한 상호작용으로 핵에 吸收될 때까지 放出하는

X-線의 光子 피이크까지도 피팅하여 에너지, 強度, 固有 輻射線幅을 정확히 구할 수 있는 국내 최초의 코드이다.

피팅 결과의 비교에서 확인되는 바와 같이, CAERI는 현재 국제적으로 가장 널리 사용되고 있는 미국의 Lawrence Radiation Laboratory에서 개발한 SAMPO나 캐나다의 Chalk River Nuclear Laboratories에서 개발한 JAGSPOT를 오히려 능가한다.

上記한 두 코드의 뒤를 이어 더욱 진보되어 개발된 印度의 SPAN과 터키의 CAASA에 비해서도 감마선 피이크의 피팅면에서는 비슷하다고 할 수 있으나 CAERI는 보익시언 線型的 취급이 追加되어 있어, 보다 더 多樣性이 있다고 할 수 있다.

또한 CAERI는 최대 5개로 구성된 피이크群을 취급할 수 있으며, 構成成分이 모두 가우시언이든지, 또는



보익시언이든지, 또는 가우시언과 보익시언의 임의의 방법으로 간섭하여 공존하는 가장 일반적인 경우의 스펙트럼을 피팅하여 에너지, 強度 및 固有輻射線幅을 구할 수 있으므로 우라늄이나 플루토늄의 동위원소별 核種分析 및 放射性 廢棄物質의 핵종분석을 위해서도 사용될 수 있다.

### 參 考 文 獻

- 1) U. Fano, "Ionization yield of radiation and the fluctuations of the number of ions", *Phys.Rev.* **72**(1947).
- 2) W. Van Roosbroeck, "Theory of the yield and Fano factor of electron-hole pairs generated in semiconductors by high-energy particles", *Phys. Rev.* **139**, (1965).
- 3) H. Baba, T. Sekine, S. Baba, and H. Okashita, "A Method of the Gamma-ray Spectrum Analysis: FORTARN IV Programs "BOB 73" for Ge(Li) Detectors and "NAISAP" for NaI(Tl) Detectors", JAERI 1227, June(1973).
- 4) J.P. Routti and S.G. Prussin, "Photopeak method for the computer analysis of gamma ray spectra from semiconductor detectors", *Nucl. Instr. and Meth.* **72**, 125(1969).
- 5) M. Dojo, "A shape function of photopeaks for gamma ray spectrum analysis with Ge(Li) detectors", *Ibid.* **115**, 425(1974).
- 6) N. Sasamoto, K. Koyama, and S.I. Tanaka, "An analysis method of gamma-ray pulse-height distributions obtained with a Ge(Li) detector", *Ibid.* **125**, 507(1975).
- 7) D.C. Robinson, "A computer programme for the determination of accurate gamma ray line intensities from germanium spectra", *Ibid.* **78**, 120(1970).
- 8) S.K. Basu and A.P. Patro, "SPAN-A Fortran program for routine and detailed analysis of gamma spectra using a small computer", *Ibid.* **126**, 115(1975).
- 9) R.G. Helmer, R.L. Heath, M. Putnam, and D. H. Gipson, "Photopeak analysis program for photon energy and intensity determinations Ge (Li) and NaI(Tl) spectrometers", *Ibid.* **57**, 46 (1967).
- 10) J. Kern, "Computer analysis of nuclear spectra and  $\gamma$ -energy standards", *Ibid.* **79**, 233(1970).
- 11) M.A. Mariscotti, "A method for automatic identification of peaks in the presence of background and its application to spectrum analysis" *Ibid.* **50**, 309(1967).
- 12) B. Grosswendt, "Automatische analyse von  $\gamma$ -spektren hoher auflösung", *Ibid.* **93**, (1971).
- 13) G.W. Phlliips and K.W. Marlow, "Automatic analysis of gamma-ray spectra from germanium detectors", *Ibid.* **137**, 525(1976).
- 14) O. Ciftcioglu, "An analytic approximation to the peaks obtained from Ge(Li) and Si(Li) detectors used in gamma spectrum analysis", *Ibid.* **174**, 209(1980).
- 15) H.H. Jorch and J.L. Campbell, "On the analytic fitting of full energy peaks from Ge(Li) and Si(Li) photon detectros", *Ibid.* **143**, 551(1977).
- 16) O. Ciftcioglu, Technical University of Istanbul, private communication, (1981).
- 17) R. Gunnink, Lawrence Livermore Laboratory, Private communication, (1981).
- 18) R. Gunnink, "An algorithm for fitting Lorentzian-broadened K-series X-ray peaks of the heavy elements", *Nucl. Instr. and Meth.* **143**, 145(1977).

## Peak Analysis of Gamma-ray and X-ray

Seung-Kon Kim\*, Young-Hoi Herr, Kwang-June Park

*Korea Advanced Energy Research Institute*

### =Abstract=

A great variety of nuclear gamma rays emitted from fission and activation products of spent nuclear fuel contains much information that can be elicited without affecting the integrity of the fuel elements. But the extraction of such information from the complex spectrum is difficult and requires computer codes.

In the present work, a versatile code "CAERI" was developed which locates peaks and calculates their areas for X-rays as well as gamma rays using elegant features of some widely used programs for gamma-ray peak fitting.

"CAERI" coded in FORTRAN used infinite series approximation more accurate than other workers various, simple, piecewise series approximations for evaluations of the Voigt function which represents the X-ray peak with non-negligible natural line width.

"CAERI" can handle even a complex multiplet consisting of peaks from X-rays and gamma rays in arbitrary mixture, which one often encounters in the isotopic analysis of heavy elements such as U and Pu.

The results of the fitting performed on the test spectra of  $^{177m}\text{Lu}$   $\gamma$ -ray and  $^{235}\text{U}$  K $\alpha$  X-ray show good agreement with those by previous workers.

---

\* Jeon-Book National University