

《해 설》

TSEE Dosimetry, 그 原理와 實際

전 재 식

한국원자력연구소
(1975년 6월 17일 접수)

序 論

Ionic crystal이나 金屬酸化物의 機械的 變形, 相變化 脫水, 結晶水의 吸收 등 結晶構造의 物理的變化 또는 表面吸着, 酸化 등 化學的變化時 및 結晶表面에 放射線照射을 하였을 경우 結晶表面으로 부터 低 energy (0.1~0.7ev 정도)의 電子가 放出되는데 이러한 電子를 exoelectron 이라고 부른다. 이 現象은 一般的으로 熱電子放出이 일어나는 溫度보다는 낮은 溫度에서 생기며 結晶構造 如何에도 많이 依存하는 現象이다. 이와같은 exoelectron 放出은 "cold emission"이라는 말로 흔히 표현되고 있지만 사실은 이현상을 처음으로 體系있게 研究하고 이를 더욱 發展시킨 Kramer의 이름을 따서 "Kramer 效果"라는 것으로 더 널리 알려져 있다.¹⁻³⁾

그런데 어떤物質에서는 이 exoelectron의 放出을 촉진시키기 위하여 試料를 加熱해야할 경우가 있다. 이것이 이른바 thermally stimulated exoelectron emission (TSEE) 이라는 것이다. 이 경우 電子放出 spectrum을 보면 어느 特定溫度에서 peak를 나타내는데 그것이 곧 그 物質의 exoelectron trap의 energy level 特性을 나타내 준다. 加熱溫度에 對하여 exoelectron 放出率을 plot한 이 spectrum을 熱螢光 glow curve와 類似한 개념에서 TSEE glow curve 라고 부른다.

一般的으로 exoelectron은 固體表面 近處의 缺陷으로부터 放出되는데 그 固體에서의 exoelectron의 平均自由行程보다 깊지 않은곳에서 放出되는 것으로 믿어지고 있다. 放出되는 exoelectron의 平均 energy 測定值를 根據로 이 깊이를 算出한바에 依하면 그 값은 100Å 미만인 것으로 알려져 있다⁴⁾.

이 分野에 관한 Kramer의 최초의 研究論文이 發表된 이래 現在까지 약 300여편의 論文이 發表되어 있지만⁵⁾ 그 大部分은 固體物理學分野에서의 應用可能性에 관계

되어있다. 이와는 달리 Kramer는 放射線에 起因되는 exoelectron 放出에 관한 研究를 계속하여 1957년에는 CaSO₄에 있어서 放射線照射量과 exoelectron 放出量 사이에 比例關係가 있음을 밝히기에 이르렀으며⁶⁾, Gorge와 Hanle 또한 獨立的으로 CaSO₄의 放射線量測定에의 TSEE 利用可能性을 指摘하였다⁷⁾. Exoelectron 放出 現象의 放射線量測定에의 應用을 具體적으로 다룬 最初의 論文은 1962년에 亦是 Kramer에 의해서 發表되었다

이와같은 研究는 1968년까지는 中部 유럽以外에서는 널리 수행되지 않았으나 그후 미국의 Oak Ridge 국립 연구소, 保健物理部의 固體放射線量測定 group에서 TSEE dosimetry 研究計劃이 本格的으로 遂行되었다. 이래 exoelectron dosimetry에 관한 關心과 이 分野의 研究를 着手한 研究所는 急速히 증가 되었다. 이에 TSEE dosimetry의 基本原理와 實際的 利用技術 및 Oak Ridge group을 中心으로 이 分野研究의 現況을 살펴보기로 한다.

1. 理論的 背景

Exoelectron의 放出機構를 說明하기 위한 理論의 展開過程에서 一次的으로 surface trap과 volume trap을 구분해서 생각 하는데 왜냐하면 이들은 다같이 exoelectron 放出에 寄與하기는 하지만 그 kinetics는 다르기 때문이다. surface trap의 경우는 吸着이나 化學的, 또는 物理的 fading 現象 등에 關聯되어 있으며 이런 trap에서의 exoelectron 放出機構를 說明하는데는 傳導帶의 概念을 導入할 必要가 없다.

反面 volume trap에 대하여서는 通常 trap된 電子들이 加熱됨에 따라 먼저 傳導帶로 勵起되고 거기서 統計적으로 work function을 극복하여 그 固體의 表面을 떠나게 된다고 생각한다. 이와같은 現象을 單純化하여 나타낸 것이 그림 1이다. 이 model은 熱螢光放出機構와 매

우 類似性이 많은데 그 때문에 TSEE 현상을 理論적으로 說明하는데 있어서 Bohun⁹⁾이나 그밖의 여러사람들이¹⁰⁻¹²⁾ Randall--Wilkins¹³⁾의 熱螢光 glow curve 解析理論을 적용하고 있다.

價電子帶나 혹은 그 주변의 電子와 그에 對應되는 正孔들은 放射線照射時나 그 直後 trap될때까지 傳導帶나 혹은 價電子帶로 擴散된다. Trap된 電子와 加熱時의 detrapping 過程에 대하여서는 다음과 같은 單純한 假定을 適用한다. 即,

1) Glow curve上的 特定 peak에 나타나는 exoelectron은 單一 energy의 trapping level에서 放出된 것이다.

2) Trap된 電子는 Maxwellian energy 分布를 하고 있다.

3) 電子의 retrapping은 발생한다고 본다.

4) Detrapping rate는 그 순간에 있어서, trap된 電子의 密度에 比例한다.

이와같은 model의 放射線照射된 crystal을 加熱하면 그 kinetics는 原理적으로 다음과같이 表示할수 있을 것이다¹⁴⁾.

溫度 T 에서 傳導帶 밑의 trap 깊이 E 로부터 單位時間에 電子가 放出될 確率 p 는

$$p = a_0 e^{-E/kT} \quad (1)$$

로 주어진다. 여기서 k 는 Boltzman 常數 (1.38×10^{-16} erg/°K)이고 a_0 는 trap을 potential box로 생각할때 진동하는 電子의 振動數와 反射係數의 積으로 表示되는 “振動數因子”로서 10^{12} sec⁻¹ 程度인 crystal 自體의 振動數보다는 작은값을 갖는다. 예컨대 BeO의 경우 a_0 는 $10^8 \sim 10^{11}$ sec⁻¹ 정도로 알려져 있다.¹⁵⁾

放射線照射로 채워진 trap의 數를 C 라고 하면 線型加熱率 $q = dT/dt$ 로 加熱하는동안 이것이 줄어드는 率, $-dC/dT$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$-\frac{dC}{dT} = \frac{C}{q} a_0 e^{-E/kT} \quad (2)$$

이식의 積分은

$$-\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \frac{a_0}{q} \int_0^T e^{-E/kT} dT \quad (3)$$

되고, $0 < T \ll E/k$ 이므로 右側積分은 다음과 같이 近似시킬수 있다.

$$\frac{a_0}{q} \int_0^T e^{-E/kT} dT \cong S(1 - \Sigma) \quad (4)$$

$$\text{但, } S = \frac{a_0 k T^2}{q E} e^{-E/kT} \quad (5)$$

Σ : 발산급수 $\Sigma (-1)^{n+1} (n+1)! (kT/E)^n$ 의 처음 몇項의 합인바 kT/E 의 어떤 주어진 값에 대하여 $(n+1)!$

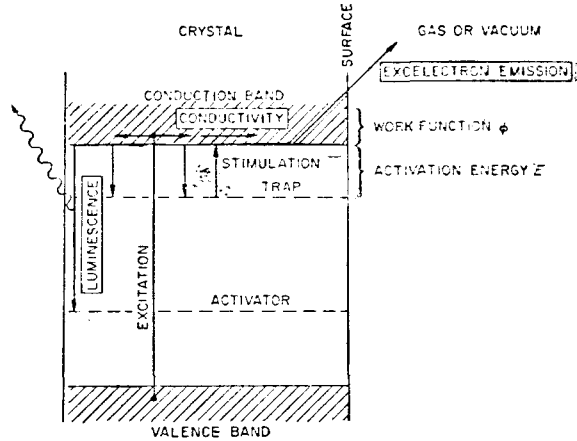


그림 1. 放射線照射된 Ionic Crystal의 加熱過程에서 發生되는 熱螢光, 電氣傳導 및 Exoelectron 放出間의 關係圖

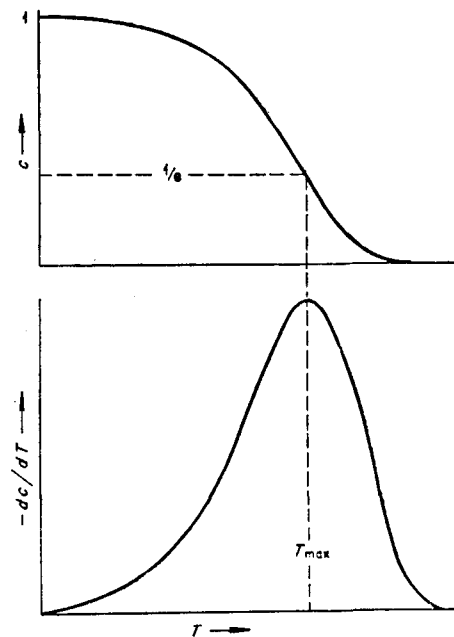


그림 2. Trap 集團 C 와 T 의 線型增加에 따른 C 의 減少

이 이 급수에서 우세해지기 시작할때 까지는 級數의 交互項間의 차이는 줄어든다. 즉, Σ 는 이 차이가 적을동안 有效한 일종의 cutoff이며 이 領域에서는 $\Sigma \ll 1$ 이다. 그러면 積分 (3)은

$$K \equiv \frac{C(T)}{C_0} e^{-S(1-\Sigma)} \quad (6)$$

된다. 여기서 K 는 C_0 trap中 온도가 T 에서 $T+dT$ 로

변하는 사이에 비어지는 率이다. 그림 2는 $-\frac{dC}{dT}$ 를 T 의 函數로 plot한 것인데 이것을 보면 TSEE glow curve의 最大值는 trap된 電子가 가장 빨리 detrapping 되는 率, $d^2C/dT^2=0$ 인 점에 對應되며 또한 $S(T_{max})=1$ 및 $C(T_{max})=e^{-1}$ 에 對應됨을 알수있다. 이 관계로부터 加熱率 q 와 TSEE peak가 나타나는 溫度 T_{max} 와의 關係式을 導出할수가 있다.

$$\text{즉, } q = \frac{a_0 k T_{max}^2}{E} e^{-E/kT_{max}} \quad (7)$$

된다. 두가지 서로다른 q 에 對한 T_{max} 값을 알면 다음과 같이 E 를 求할수가 있다.

$$E = k \frac{T_{max1} \cdot T_{max2}}{T_{max2} - T_{max1}} \ln \frac{q_2 T_{max1}^2}{q_1 T_{max2}^2} \quad (8)$$

이 方程式들은 E , a_0 等, 여러物質의 각기 다른 TSEE peak에 대한 term data를 求하는데 널리 利用되어 왔다^{4,9)}. Trap을 確認, 鑑定하는데 이들 data의 使用이 試圖되었으나 이 單純한 model은 우리가 觀察하는 모든 TSEE 현상을 설명 하기에는 만족스럽지 못한 것이다. 따라서 該의 여러사람들이 model의 수정과 그 理論的說明을 계속試圖하고 있지만 아직은 完璧한것이 없고 어느 特定現象을 說明하는데는 그 나름의 特色들이 있는것 같다. 예를들면 Balarin과 Zetzche는 광범위한 실험 data로부터 trapping depth를 決定하기 위한 理論을 展開 했으며¹⁵⁾ Holzapfel은 앞서 言及한 model (Nassenstein-Bohun model로 알려져 있음)이 改良을 試圖하였는가 하면⁴⁾ Kriegseis와 Scharman은 두가지 理想적인 경우를 다루어 TSEE model을 展開하고 있다¹⁶⁾.

또한 Drenckhan과 그 共同研究者들같이 0.5~2Kev 程度の 低 energy 入射電子에 起因하는 surface trap으로 부터의 exoelectron 放出理論을 展開한 경우도 있다.¹⁷⁾ 그러나 그어느 하나도 아직 완전한것은 되지 못하고 있다.

2. TSEE 物質

TSEE detector로서 바람직한 物質을 찾아내기 위한 연구는 상당히 광범위하게 遂行되어 심지어 계란껍질, hemoglobin, 月石等, 낮은 物質에 까지 그研究가 미쳐어 있다¹⁸⁾. 그러나 무엇보다 먼저 알아야 할것은 우리가 찾아야할 물질이 TSEE detector로서 갖추어야할 基本要件을 갖추어야 한다는점 이다. 그요전들을 정리해 보면 다음과 같다¹⁹⁾.

첫째, glow curve上的 peak가 150°C로부터 600°C 사이의 溫度에 나타나야 한다. 1°C 이하에서 나타나는

peak는 室溫이나 그보다 다소높은 온도에서 fading이 빨리 일어나므로 그만큼 不利하며 만일 600°C 이상에서 glow peak가 나타난다면 exoelectron을 檢出하기 위한 檢出裝置 (電離函, G-M管等 主로 氣體封入計數管)內에서의 熱電子放出로 말미암아 測定値에 攪亂을 받기 때문이다.

둘째, detector 材質은 大氣中の 酸素나 濕氣에 대하여 化學적으로 安定된 것이어야 하며 表面에 吸收 또는 吸着하는 경향이 없어야 한다. 또한 이物質은 空氣 또는 counting gas 내에서 여러번 加熱하여도 exoelectron 放出特性이 변하지 않을 정도로 熱적으로도 충분히 安定된 것이어야 한다.

셋째로 放射線에 대한 感도가 높은 物質 이어야 한다 넷째, LET 依存性, 線量直線性等 放射線量測定上的의 諸特性(dosimetric property)이 적당해야 하며 X선, γ 선등 光子 測定을 위하여서는 energy 依存性이 적도록 有效原子番號가 적은 物質이어야 한다.

끝으로 바람직한 要件은 調製過程이 單純하여 再現性이 좋아야 하며 實用的인面 加가 생각 한다면 生産單價도 낮아야 할것이 바람직 하다.

以上과 같은 諸條件들을 염두에 두고 현재까지 研究되어온 物質들을 살펴보면 대략 다음과 같은 物質들을 들수 있다.

1) 할로젠化合物과 硫化物

가장 널리 研究된 alkali halide로 LiF를 꼽지 않을수 없다. LiF의 TSEE glow curve를 보면¹⁸⁾ 120~150°C 근처에 큰 peak가 하나 나타나는데 이것은 surface trap에 起因하는 것인데 보다 높은 溫度에서의 peak는 F 및 M center에 起因하며 270~350°C 사이에 나타난다²⁰⁾.

Mg, Ti로 activate된 熱螢光級(TL-grade)의 LiF에서는 加熱率을 다소 낮추어주면 170~220°C에 또다른 peak가 나타나는 것을 볼수 있다.²¹⁾ LiF의 TSEE에 영향을 주는 몇가지 因子들이 있는데 예를들면 Peak ratio의 LET 依存性, 事前熱處理의 영향등이 그것이다. 放射線을 照射한 detector를 保管하는 동안에 TSEE 特性이 變化되는 수도 있다.²¹⁾

CaF₂는 가장 잘研究된 alkaline earth halide의 하나이다. 化學적으로 純粹한 CaF₂는 ~75°C, 155°C 및 240°C (main peak)에 세개의 TSEE peak가 나타나는 데 이 peak들은 각각 0.71, 0.91 및 1.03 eV의 熱的勵起 energy에 相應한다. Mn으로 activate된 CaF₂에서는 290°C 근처에 단 한개의 강한 TSEE peak가 나타날 뿐

Table 1. TSEE Materials

Materials	Peak temperature(°C)	References
Halides and Sulfates	LiF	120~150, 270~350
	LiF:Mg, Ti	170~220
	CaF ₂	~75, 155, 240(main)
	CaF ₂ :Mn	~290
	BaF ₂	125, 180, 326
	SrF ₂	118, 253, 383
	CaSO ₄	100~430(several pks.)
	BaSO ₄	120~190 (")
	SrSO ₄	~250
	SrS	220~350
	ZnS	
	CaS:Sm	
Metal Oxides	BeO	325(main), 450
	Al ₂ O ₃	320, 525(main)
	MgO	400
	NiO	160, 260
	CuO	140, 200
	ZnO	70, 300

이다.¹⁸⁾

그밖에 TSEE detector로 研究된 halide나 sulfate로 BaF₂, SrF₂, CaSO₄, BaSO₄ 등이 있는데 이들에 關한 peak 溫度는 表 1에 모두 整理 하였다.

2) 金屬酸化物

金屬酸化物的 하나로 堅固하고, 熱的, 化學的耐性이 強하며, 比較的 낮은 原子番號에다, 放射線에 對한 感度가 높으며 peak 溫度가 적당한것等 [325°C (main peak) 및 450°C], TSEE detector로 바람직한 特性을 備고루 가춘것이 BeO이다. 이런 理由때문에 BeO 야말로 主로 放射線量 測定目的을 위하여 最近에 各광을 받고 널리 연구된 TSEE 物質中の 하나 이다. 熱處理가 안된 BeO 粉末은 매우 毒性이 強하지만 高溫에서 熱處理한 後에는 이문제는 해소되며, 現在는 Brush Beryllium Co. 에서 Thermalox 995라는 商品名으로 나오는 ceramic BeO pellet이 이分野 研究에 많이 利用되고 있다.

지금까지 BeO의 TSEE에 關하여 研究된바 로는 다음

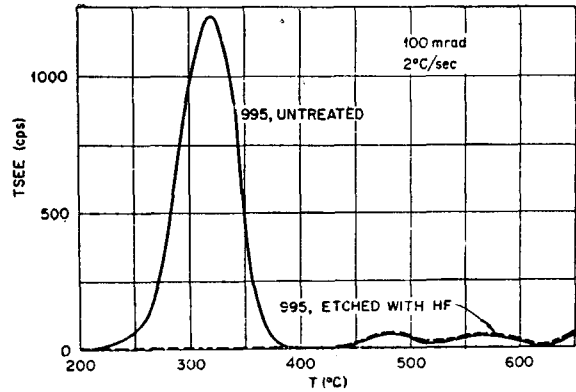


그림 3. 放射線誘導된 BeO 995의 TSEE Glow Curve (HF 용액으로 表面 SiO₂를 腐蝕, 除去하기 前과 後)

과 같은 事實들이 알려져 있다.^{14, 20, 22-26)}

a) Detector 表面을 Au, Pd 또는 Pt등을 薄層으로 도포하여 熱處理하면 325°C의 main peak가 더 커지는데 이 現象은 ~600°C 보다 높은 온도로 加熱하고 나면 사라진다.

b) 一般的으로 325°C의 TSEE peak는 放出表面의 SiO₂ 存在與否에 影響을 받는 表面의 電氣傳導度에 밀접한 關係가 있다. 即, 그림 3에서 보는 바와같이 HF 용액으로 SiO₂를 腐蝕除去하면 이 peak는 안나타나고 다시 첨가하면 peak가 다시 生成된다.

c) 1400°C에서 數時間동안 事前熱處理를 하면 放射線 感度가 最高로 增加된다.

d) β, γ 및 X線과는 달리 deuteron이나 α 粒子等 粒子線의 照射로 TSEE peak ratio에 反永久的인 變化를 가져올수 있다.¹⁴⁾

이밖에도 Al₂O₃, MgO등 여러가지의 金屬酸化物에 關해서도 연구된바 있는데 이들에 關하여서는 表 1을 다시 參照하기 바란다.

3. TSEE에 影響을 주는 因子들

어떤 detector에 있어서 그 TSEE特性은 detector 自體 乃至, 여러가지 環境因子에 따라 影響을 받게 된다. 그러한 因子들을 大別해 보면, 事前熱處理效果, 事前放射線照射效果 및 其他因子등으로 나눌수가 있다.

1) 熱處理效果

TSEE detector의 事前熱處理는 表面構造, 粒子 size, 表面電氣傳導度等의 變化와 密接한 關係가 있다. 特히 電氣傳導度가 낮아지면 exoelectron이 放出되는 동안

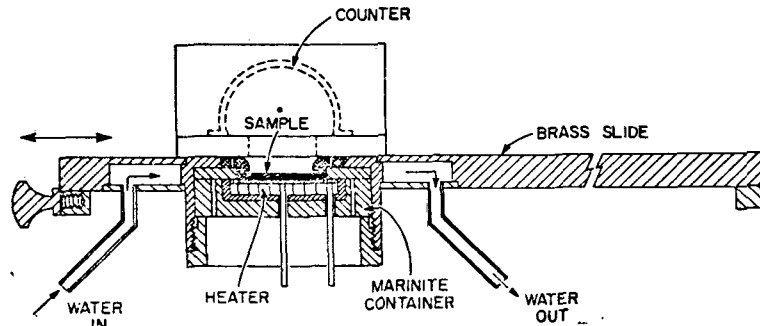


그림 4. TSEE 判讀用 gas flow G-M Counter

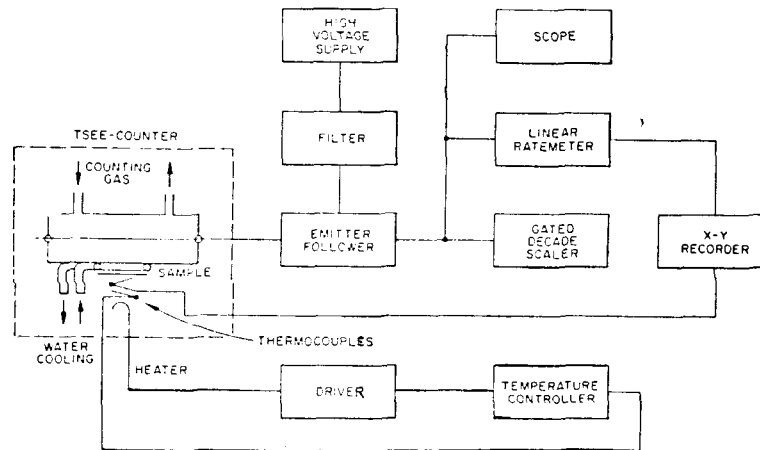


그림 5. TSEE 判讀用 G-M 計數回路 block diagram

表面에 蓄積되는 剩餘 陽電荷로 말미암아 exoelectron 放出이 鈍化될 우려가 있다. 이런 경우에는 10~20% 程度の graphite나 金屬導體를 첨가해서 쓸 수 있으나 金屬을 쓰는 경우에는 exoelectron이 많이 吸收되어 그 放出이 減少될 수도 있다. 事前熱處理로 放射線에 대한 感度を 높일 수가 있으나 어느 溫度 (臨界溫度) 까지는 增加하지만 그보다 높은 溫度에서 다시 感度が 줄어든다. 그 理由는 脫水, 새로운物質의 形成, 또는 分解等 物質의 變質때문인 것으로 알려져 있다.

2) 放射線照射効果

$10^2 \sim 10^3 R$ 程度の 放射線量은 事前에 照射하였더라도 적당한 熱處理로 完全히 漂白시킬 수가 있다. 그러나 이보다 높은 線量을 照射하였을 경우에는 半永久的 또는 永久的으로 이 物質의 TSEE 特性이 變한다. 그러한 좋은 例로 ceramic BeO에 $10^4 \sim 10^6 R$ 의 Co-60 γ 線을 照

射하여 $600 \sim 800^\circ C$ 로 熱處理 하므로써 이 detector의 γ 線感度を 5~8倍 程度, $290 \sim 360 nm$ 波長의 紫外線에 대한 感度を 數百倍 높은 경우를 들 수 있다²⁷⁾.

특히 LET가 큰 放射線을 高線量 照射하였을 경우에도 detector 特性이 變質된 것을 볼 수 있는데, deuteron을 照射한 ceramic BeO의 경우 $325^\circ C$ peak가 줄어들고 $450^\circ C$ peak가 높아진 경우가 報告되어 있다¹⁴⁾.

LiF, NaF나 CaF_2 등도 적당한 線量의 X線을 照射시켜 어느程度 그 感度を 높일 수가 있다.

3) 其他因子들

TSEE를 判讀할 때 加熱率을 높여주면 一般的으로 TSEE peak는 더 높은 溫度에서, 幅이 좁고 높이가 높게 나타난다. 뿐만 아니라 peak 높이와 peak 位置는 照射한 放射線의 LET 값에도 많이 依存한다.

放射線照射後의 保管時間이나 溫度는 fading과 밀접

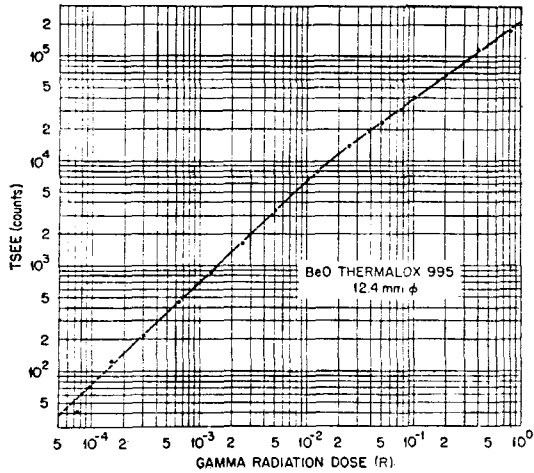


그림 6. Ceramic BeO 995의 gamma線量에 對한 TSEE response

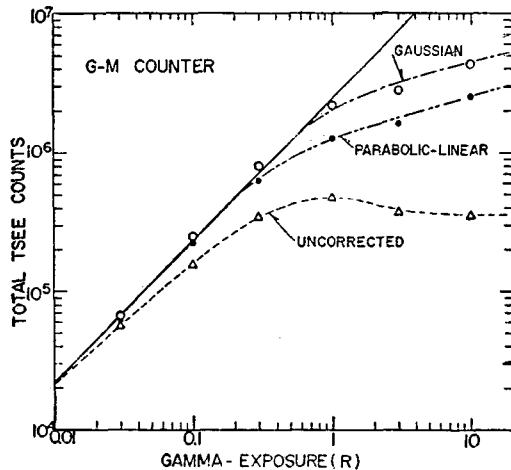


그림 7. G-M counter로 判讀한, gamma線 照射된 ceramic BeO의 TSEE response. (計數損失 補正前과 後)

한 關係가 있는데 低溫度 peak 일수록 fading은 빨리 일어나며 이것은 또 주위 空氣의 濕度, 酸素含有量等에도 많은 영향을 받는다.

可視光線이나 紫外線照射效果도 漂白, 累積 등 TSEE出力에 영향을 미치는 重要因子의 하나가 되고 있다.

4. TSEE 檢出 및 判讀裝置

지금까지 널리 사용되어온 TSEE 檢出裝置는 電離函,

比例計數管, G-M計數管等, 主로 氣體封入型 計數裝置이다. 이中에서도 가장 널리 사용되어 오고 있는것이 그림 4에서 보는바와 같은 氣體流入型 G-M Counter이다. 一般적으로 G-M counter가 比例計數管보다는 溫度의 영향을 적게 받아 G-M counter의 plateau는 400°C의 溫度에서도 크게 영향을 안받고 있다. 여기에 걸드러 TSEE를 完全히 判讀토록하게 되어 있는 電子裝置의 block diagram의 한例를 보면 그림 5와 같다.

검출장치의 設計過程에서 고려하여야할 點은 exo-electron을 放出하는 表面과 檢出부피와의 거리에 항상 再現性이 있어야 한다는 것이다.

Detector를 加熱해주는 熱板은 熱傳導가 좋은 反面 電氣傳導는 可能한限 나쁜 物質을 擇해야 된다.

TSEE 初期研究者들은 判讀 data의 再現性이 좋지않아 여러가지로 苦心 하였는데 이것을 改善한 한가지 方法으로 熱板에 -60~-100V 程度의 直流加速電壓을 걸어 주어 TSEE의 再現性 向上은 물론, 그 感度 自體를 約 3배나 높인 例가 있다²³⁾.

5. 結論—TSEE Dosimeter

1957年 Kramer에 依하여⁶⁾ CaSO₄에서의 exoelectron 放出과 放射線照射量과의 比例性이 最初로 지적된 以來 더깊은 研究는 60年代末 까지 매우 完滿하게 進행되어 왔다. 그후에 이 分野研究를 進행한 여러 研究 team中에서도 放射線量計로서의 TSEE detector 開發研究는 Oak Ridge의 固體線量測定 group에 依하여 主로 BeO를 對象으로 꾸준히 進행되어 왔다.

그 結果로 ceramic BeO의 TSEE—照射線量 直線性이 α 線에 對하여 1~500 rad 영역에 걸쳐 거의 完壁하며, 電子線의 경우에는 10~4000 rad 영역에 걸쳐 있음이 보고되어 있다.¹⁴⁾ 뿐만 아니라 적당한 radiator와 組合하여 쓰면 中性子線量測定에도 사용될수가 있다^{14, 18)}

γ 線에 對하여서는 低位線量에 까지도 直線性을 나타내어 0.2mR까지 무난히 測定할수 있음은 그림 6에서 볼수 있는바와 같다. 이 그림에서 보던 $\sim 10^2$ R 近處에서 부터 高線量쪽으로 直線의 slope가 變換것을 볼수 있는데 이것은 後에, G-M counter의 比較的 긴 不感時間에 起因한 計數損失 때문임이 判明되었으며 이것을 Elograph digitizer와 programable calculator를 使用하여 數值的으로 補正하는 方法이 本著者等에 依하여 發表된바 있다.²⁰⁾ 그 補正結果의 한例를 그림 7에 나타 내었다.

結論으로 熱螢光線量計等 다른 固體線量計와 比較하여 TSEE 線量計의 몇가지 長點을 열거 하기로 한다.

첫째 TSEE detector는 X線이나 γ 線에 매우 敏感하여 環境放射線이나 放射線防護水準의 極低位 放射線量測定에 利用할수 있다. 例컨데 CaSO_4 의 경우 別로 복잡한 機器나 fading의 염려 없이 μR 水準의 放射線량을 무난히 測定한 경우가 있다¹⁸⁾.

둘째, 判讀過程에 熱螢光線量計를 判讀할때 처음 赤外線放出에 의한 攪亂영향이 없어 比較的 高温에서 사용할수가 있으므로 低温 peak에서 흔히 있는 fading 效果를 거의 없이 할수 있다.

셋째 TSEE detector는 本質으로 “二次元” detector 이므로 反跳陽子나 低 energy β 線等 飛程이 짧은 放射線測定에 큰 利點이 있다.

以上과 같은 TSEE 特有의 長點을 살려 實用化된 TSEE 線量計가 머지않은 將來에 나올것으로 展望된다.

参 考 文 獻

1. J. Kramer; Z. Physik **125**, 739(1949)
2. J. Kramer; *ibid* **128**, 538 (1950)
3. J. Kramer; *ibid* **129**, 34 (1951)
4. G. Holzapfel; Phys. Stat. Solid. **33**, 235(1969)
5. K. Becker; CRC Critical Rev. in Solid States Sciences, p. 39, March (1972)
6. J. Kramer; Acta Phys. Austriaca **10**, 392 (1957)
7. G. Gourge and W. Hanle; *ibid* **10**, 427 (1957)
8. J. Kramer; Z. Angew. Phys. **15**, 20 (1962)
9. A. Bohun and J. Dolejsi; Czech. J. Phys. **9**, 578 (1959)
10. W. T. Pimbley and E. E. Francis; J. Appl. Phys. **32**, 1729 (1961)
11. J. F. Young and D. J. Williams; *ibid* **34**, 3157 (1963)
12. M. Balarin; Acta Phys. Austriaca **17**, 127 (1963)
13. J. T. Randall and M. H. F. Wilkins; Proc. Roy. Soc. Ser. A, 184, 347, 366, 390 (1945)
14. K. W. Crase; ORNL-TM-3572(1971)
15. M. Balarin and A. Zetzche; Phys. Stat. Solid. **2**, 1670 (1962)
16. W. Kriegseis and A. Scharman; Proc. 3rd Int. Symp. on Exoelectrons, PTB Braunschweig (1970)
17. J. Drenckhan *et al.*; *ibid* (1970)
18. K. Becker; Solid State Dosimetry, p. 116, CRC Press, Cleveland (1973)
19. K. Becker; At. Energ. Rev. **8**(1), 173(1970)
20. K. Becker *et al.*; Health Phys. **19**, 391 (1970)
21. A. E. Nash *et al.*; Proc. 3rd Int. Conf. Lumin. Dosimetry, Risö-Rept. 249, p. 1123 (1971)
22. K. Becker *et al.*; Proc. 3rd Int. Symp. on Exoelectrons, PTB Braunschweig (1970)
23. R. B. Gammage *et al.*; Proc. 3rd Int. Conf. Lumin. Dosimetry, Risö-Rept. 249, p. 573 (1971)
24. E. Rotondi and T. Suppa; *ibid* p. 480(1971)
25. J. S. Nagpal and R. B. Gammage; Radiation Eff. **20**, 215 (1973)
26. A. Moreno *et al.*; ORNL-TM-3668(1972)
27. J. S. Jun and K. Becker; unpublished (1974)
28. K. Becker *et al.*; ORNL-4903 (1973)
29. J. S. Jun and K. Becker; Nucl. Instr. Meth. in press (1975)
30. P. Gordan *et al.*; Phys. Stat. Solid. **33**, 97 (1969)
31. G. Holzapfel; Z. Angew. Phys. **29**, 107 (1970)
32. B. Sujak and K. Gieroszynska; Acta Phys. Pol. **52**, 541 (1967)
33. B. Sujak and S. Gasior; *ibid* **33**, 231 (1968)
34. J. Novotny *et al.*; J. Phys. Chem. Solids **31**, 1412 (1970)
35. E. Rotondi and R. Bordoni; CNEN-RT/FI(70)4 (1970)
36. V. L. Levshin and P. A. Pipins; Sov. Phys. Solid State **5**, 691 (1963)
37. A. Ambrosetti and M. Oberhofer; EUR-4904 (1972)
38. E. Chrysosou and G. Holzapfel; Phys. Stat. Solid. **8**, 47(1971)