

低에너지 X-線場에서 필름배지에 의한 個人被曝線량의 決定

河正雨 · 金章烈 · 徐慶源

한국에너지연구소, 방사선안전관리실

= 要 約 =

우라늄, 플루토늄 및 그 子核種으로부터 放出되는 低에너지감마線 또는 低에너지領域의 X線스펙트럼으로부터의 필름배지 個人被曝線量解析 및 評價에 必要한 技術資料를 提供하였다.

필름배지는 韓國核燃料開發公團(現 韓國에너지연구소)에서 開發한 것이며, 低에너지標準線源은 放射線量強度의 損失을 最少로 維持하면서 可能한 한 X線스펙트럼幅을 金屬필터로 좁게 줄인 X線을 利用하였다. 그 結果 얻은 X線에너지는 49 keV, 154 keV 및 256 keV 이었으며, 이 값은 Kramer의 理論的計算結果와 잘 一致하였다.

이들 에너지群別 X線의 필름光學密度와 線量과의 關係는 Matrix法으로 解析하여 測定光學密度로부터 低에너지 X線의 個人被曝線量を 直接 換算할 수 있게 되었다. 이 結果는 國內 放射線作業 從事者들의 個人被曝線量測定資料의 均質性 向上에 寄與하게 될 것이다.

I. 序 論

放射線發生裝置와 放射性物質의 産業的, 醫學的 및 研究開發에의 利用에 必然的으로 隨伴하는 放射線被曝에 의한 障害를 防止하기 위해서는 安全取扱施設과 器具를 完備하여야 함은 물론 作業者의 被曝線量を 正確히 評價할 必要가 있다. 특히 廣範圍한 에너지分布特性을 갖는 X線 또는 감마線場內에서 여러 에너지群의 放射線을 分離하여 올바른 線量評價를 하는 것은 극히 重要하다.

現在 使用하고 있는 모든 필름의 寫眞乳劑의 應答特性(response)은 銀과 臭素의 吸收端 近處에서 에너지에 따라 그 變化가 크고, 이 에너지領域에 最大値를 나타낸다. 이러한 特性때문에 넓은 光子에너지 領域에 걸쳐 X線이나 감마線도시메트리(dosimetry)用으로 寫眞乳劑를 使用하는데 制限性이 있다. 그래서 필름線量計에 照射되는 放射線이 이들 吸收端의 에너지領域의 成分을 가지고 있을 때에는 放射線스펙트럼을 알지 못하면 필름의 光學密度(黑化度)로부터 被曝線量を 解析하는 것은 不可能하다. 이와같은 難點을 解決하고 未知의 線質特性의 放射線의 線量決定에 有用한

필름線量計를 設計하고자 하는 各種 試圖가 遂行되었다.

Tochilin¹⁾, Baker와 Silverman²⁾ 그리고 다른 研究者들은 金屬吸收體를 利用하는 方法을 提案하였다. 이 方法은 필름과 함께 接合되어 있는 吸收物質에 起因된 散亂效果를 除去할 수 없는 難點때문에 不正確하였다. 이보다 앞서 Pardue等³⁾과 Deal 및 Day⁴⁾는 필름應答特性피크를 필름表面에 카드뮴箔을 놓아 補償하고자 하였다. Pardue와 그의 共同研究者들은 카드뮴흡수체의 두께를 實驗的으로 決定하였다. Deal과 Day는 Dupont 552필름에 대한 校正에서 꼭같은 두께의 카드뮴흡수체를 使用하였다.

이 報告書에서 遂行한 研究도 全乳劑表面을 덮고 있는 金屬吸收體에 의하여 放射線의 線質에 獨立인 필름應答特性을 만들 수 있다는 Pardue 및 Deal의 假定에 바탕을 두고 이루어졌다. 여러 金屬필터의 效果를 計算하여 要求되는 두께가 決定되었으며, 그 結果를 實驗的으로 檢證하였다. 이러한 過程을 거치어 開發된 필름線量計는 Fig. 1과 같다. 이 報告書는 이와같이 開發된 韓國에너지연구소의 필름배지를 利用하여, 우라늄, 플루토늄 그리고 그 子核種으로부터 放出되는 低에너지감마放射線과 X線스펙트럼으로부터의 필름배

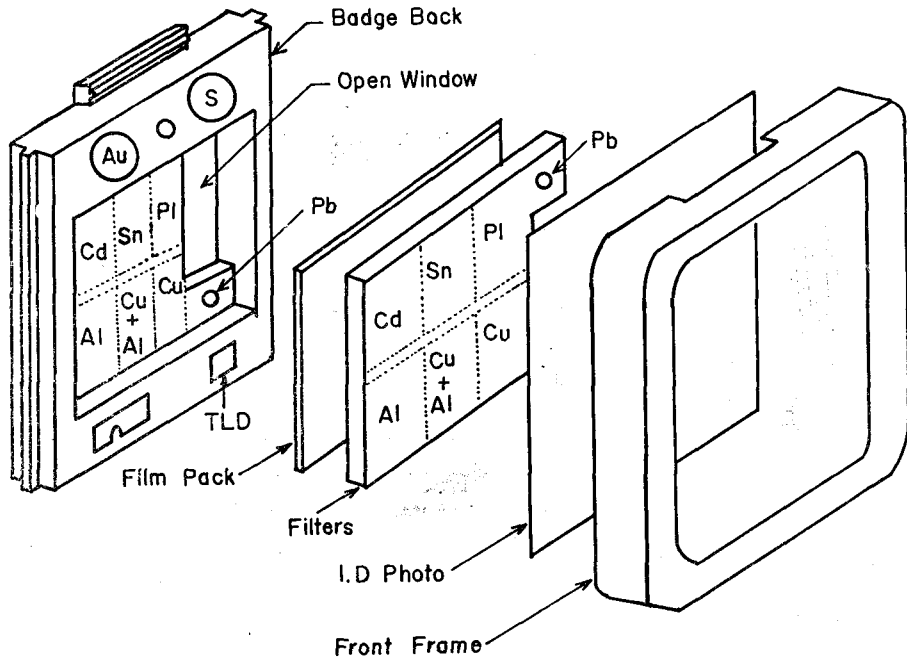


Fig. 1. Exploded view of Film Badge (Model-1)

지 個人被曝線量解析 및 評價에 要求되는 技術資料를 提供하였다.

低에너지光子領域은 0.03 MeV 와 0.3 MeV 사이에서 49 keV, 154 keV 및 256 keV 의 에너지를 選定하였으며, 이들 에너지群別 필름黑化도와 線量과의 關係는 Matrix 法으로 解析하여 測定黑化도로부터 直接 個人被曝線量を 換算할 수 있는 評價法을 얻었다.

이 結果는 國內 필름배지서비스業體와 關聯業所에 技術傳受시키어 放射線作業從事者들의 個人被曝線量測定데이터의 均質性을 向上시키는데 크게 寄與할 것으로 期待된다.

II. X-線 스펙트럼의 變更

여러 種類의 필터組合에 대한 評價技術은 線量比, Do/Dw 를 얻을 수 있는 計算에 根據를 두고 있다. 이 計算은 常電壓X線發生裝置로부터 나오는 多色 X線에 대하여 이루어졌다. 이러한 線源은 어느 特定에너지領域에서 單一에너지線源의 利用이 不可能한 경우 線量計校正에서 實質적으로 使用되고 있다. 에너지帶의 幅은 條件이 許容하는 한 좁게 만들었다.

X線管의 標的으로부터 放出된 X線의 상세한 스펙트럼은 一般적으로 모른다. 그러나 간단한, 理想的인 스펙트럼分布라는 假定下에서 吸收現象에 의한 스펙트

럼變更과 線量減縮에 대한 有用한 情報를 얻을 수가 있다.

Kramer의 理論式⁵⁾에 따르면, 電子衝擊當 放出되는 $E \sim E+dE$ 사이의 스펙트럼에너지는 다음과 같이 주어진다.

$$I(E)dE = -C(E - C_0)dE \dots \dots \dots (1)$$

이 式은 放射線量 對 에너지 曲線에서 $-C$ 의 傾配를 가진 直線을 나타낸다.

만일 $I_0(E)dE$ 가 Kramer 式에서 나타내는 바와같이 光子에너지區間 dE 에서의 스펙트럼強度分布이고 $I_1(E)dE$ 가 X線管의 固有필터에 의하여 減衰된 후의 同一區間에서의 強度分布라고 하면 다음 關係가 成立된다.

$$I_1(E)dE = I_0(E)e^{-\mu_1(E)x_1} dE \dots \dots \dots (2)$$

여기에서 $\mu_1(E)$ 는 線型吸收係數, x_1 은 X線管필터의 두께이다. 放射線量 $I_2(E)dE$ 는 X線빔이 두께 x_2 의 附加필터를 通過한 후 에너지區間 dE 에서의 스펙트럼強度分布를 나타낸다. 그래서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I_2(E)dE = I_1(E)e^{-\mu_2(E)x_2} dE \dots \dots \dots (3)$$

만일 스펙트럼 $I_2(E)$ 의 特性을 가진 X線빔이 自由空氣전리함에 들어오면 스펙트럼의 微少量 ΔE 가 照射線量으로 測定한 線量 D 에 寄與한다. 電子雙生成發端에너지 以下에서 이 分量은 $I_2(E)\Delta E$ 에 該當空

氣吸收係數, $[\mu(E) - \mu_s(E)]_{\text{air}}$ 를 곱한 強度로서 주어진다. 그래서 分量,

$$\Delta D \propto [\mu(E) - \mu_s(E)]_{\text{air}} I_2(E) \Delta E \dots \dots \dots (4)$$

는 콤프톤電子에 의하여 X線빔으로부터 除去된 1次 X線빔의 強度를 나타낸다.

따라서 全線量은 다음 式으로 表示된다.

$$D \propto \int_0^{E_0} I_2(E) [\mu(E) - \mu_s(E)]_{\text{air}} dE \dots \dots \dots (5)$$

結果的으로 式(1) 내지 (5)를 結合하면 다음 式을 얻게 된다.

$$D \propto \int_0^{E_0} I_0(E) e^{-\mu_1(E)x_1} \cdot e^{-\mu_2(E)x_2} [\mu(E) - \mu_s(E)]_{\text{air}} dE \dots \dots \dots (6)$$

여기에서 $I_0(E)$ 는 Kramer 理論式으로부터 얻을 수 있으며, D 는 전리함으로부터 얻게 되어, 結果的으로 여러 種類의 金屬필터를 組合하여 變更된 X線스펙트럼의 有效에너지를 얻게된다.

III. 照射線量과 黑化度와의 關係

감마線에 대한 필름의 應答特性은 入射放射線의 에너지의 函數로서 變化한다. 이러한 에너지依存性을 利用하여 필름배지내 필터의 種類를 여러가지로 使用함으로써 廣範圍한 에너지分布를 갖는 감마線의 照射線量을 測定할 수 있다.

필름배지에 여러가지 種類의 金屬필터를 삽입하면 각 필터區域을 通過한 入射放射線의 세기는 그 減衰程度의 差로 인해 달라지고, 이에따라 필름에 나타나는 黑化도는 필터區域別로 다르게 나타난다. 그러므로 에너지를 變化시키면서 필름의 필터區域別 黑化度變化特性을 決定하면 에너지區間別 被曝線量を 算出할 수 있게 된다.

이 報告書에서는 使用된 필터의 種類와 두께, 그리고 核物質取扱施設의 特性을 考慮하여 배타粒子를 1個의 에너지群으로 假定하였고, 廣範圍한 에너지分布를 갖는 감마線을 4個의 에너지群, 卽, 50 keV 群, 250 keV 群, 그리고 600 keV 群으로 나누었다. 結果的으로 각 필터領域에서의 總黑化도는 각 에너지群에 대한 寄與度の 合으로 表現될 수 있다.

$$R_i = R_i^a + R_i^b + R_i^c + \dots R_i^d \dots \dots \dots (7)$$

여기에서 R_i 는 i -필터 領域의 필름黑化도를 表示하고, 上添字는 에너지群을 意味한다. 또한 필름배지내 각 필터區域을 다음과 같이 定義하였다.

$i=1$; Cd-필터

$i=2$; Cu-필터

$i=3$; Al-필터

$i=4$; Pl(플라스틱)필터

그리고 에너지群은

$a=50 \text{ keV}_{\text{eff}}$ X線

$b=150 \text{ keV}_{\text{eff}}$ X線

$c=250 \text{ keV}_{\text{eff}}$ X線

$d=600 \text{ keV}_{\text{eff}}$ 감마線

e =배타線

으로 定義하였다. 그래서 R_2^c 는 $250 \text{ keV}_{\text{eff}}$ X線에너지群에 의한 Cu 필터區域의 黑化도를 나타낸다.

만일 배타粒子가 2.5 cm 두께의 ABS 플라스틱 필터에 의하여 전부 吸收된다고 假定하면 배타粒子에 의한 寄與는 플라스틱 필터와 無필터區域의 黑化度 差로부터 쉽게 決定될 수 있다. 그러므로 감마線에 의한 寄與만을 考慮하면 式(7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_i = R_i^a + R_i^b + R_i^c + R_i^d \dots \dots \dots (8)$$

한편, 黑化도와 照射線量 D 와의 關係는 다음과 같이 주어지게 될 것이다.

$$R = 0.43 gN [1 - \exp(-gD)] \dots \dots \dots (9)$$

式(9)에서 照射線量 D 가 적으면, 近似的으로 다음과 같이 쓸 수가 있다.

$$R = 0.43 g^2 ND \dots \dots \dots (10)$$

여기에서 g 는 臭化銀(AgBr)의 結晶粒度的 斷面積이고, N 은 單位面積當 結晶粒度的 數이다.

式(10)에서 $0.43 g^2 N \equiv m$ 이라고 놓으면

$$R = mD \dots \dots \dots (11)$$

m 은 結果的으로 黑化度-照射線量の 曲線의 기울기가 된다.

式(11)을 式(8)에 代入하면 다음 式을 얻게 된다.

$$R_1 = m_1^a D^a + m_1^b D^b + m_1^c D^c + m_1^d D^d$$

$$R_2 = m_2^a D^a + m_2^b D^b + m_2^c D^c + m_2^d D^d$$

$$R_3 = m_3^a D^a + m_3^b D^b + m_3^c D^c + m_3^d D^d$$

$$R_4 = m_4^a D^a + m_4^b D^b + m_4^c D^c + m_4^d D^d$$

이 式은 다시 行列式形式으로 다시 整理하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_1^a & m_1^b & m_1^c & m_1^d \\ m_2^a & m_2^b & m_2^c & m_2^d \\ m_3^a & m_3^b & m_3^c & m_3^d \\ m_4^a & m_4^b & m_4^c & m_4^d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D^a \\ D^b \\ D^c \\ D^d \end{pmatrix} \dots \dots \dots (12)$$

그러므로 黑化度 R 要素와 기울기 m 要素들은 필름較正에 의하여 實驗的으로 決定된다. 式(12)에 逆行列式을 곱하여 주면 각 에너지群別 照射線量を 구하는 式을 얻게 된다.

Table 1. Filter materials used to determine effective energy at the different peak voltage of X-ray

Filter No.	Filter Material	Thickness (mm)	Peak Voltage of X-ray	Maximum Current
1	Aluminium	4.00	80 kVp	15 mA
2	Aluminium	3.90	100 kVp	15 mA
	Copper	0.60		
3	Aluminium	3.85	150 kVp	15 mA
	Copper	1.90		
4	Aluminium	3.8	200 kVp	15 mA
	Tin	1.9		
5	Aluminium	3.85	250 kVp	10 mA
	Tin	2.8		
6	Aluminium	3.85	300 kVp	10 mA
	Tin	2.8		
	Copper	4.8		

* Inherent filter of 2.20 mm Be is added to each filter

$$\begin{pmatrix} D^a \\ D^b \\ D^c \\ D^d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1^a & m_1^b & m_1^c & m_1^d \\ m_2^a & m_2^b & m_2^c & m_2^d \\ m_3^a & m_3^b & m_3^c & m_3^d \\ m_4^a & m_4^b & m_4^c & m_4^d \end{pmatrix}^{-1} \quad (13)$$

이 式을 간단한 形式으로 다시 쓰면

$$\vec{D} = \vec{R} \vec{M}^{-1} \quad (14)$$

과 같이 된다. 여기서 이 式의 解는 使用한 필터와는 獨立의 値를 알 수 있다. 따라서 \vec{M}^{-1} 을 필름 校正에 의하여 實驗적으로 確立하여 놓으면 黑化度 \vec{R} 만을 測定함으로써 各 에너지 群別 放射線被曝線량을 評價할 수 있다.

IV. 實 驗

4-1. 有效에너지 決定

X線發生裝置(model MCN-321)에서 固有 필터(inherent filter)에 의하여 減衰되어 나온 X線을 電壓에 따라 Table 1과 같은 필터로 濾過시켜 보다 淸淨이 용이한 스펙트럼을 얻었다. 이 스펙트럼의 有效에너지는 필터를 通過하여 나온 X線에 대한 半價層을 測定함으로써 決定할 수 있다.

有效ener지를 決定하기 위한 吸收曲線은 X線 出口에서 1 m 距離에 알루미늄과 구리 吸收體를 Table 2에 나타낸 바와같이 管電壓에 따라 組合시키어, 透過되어 나온 X線의 照射線량을 건리함으로 測定하여 얻었다.

이 吸收曲線으로부터 質量減衰係數를 구하여 對應하

는 에너지로 換算하여 얻은 各 吸收體의 質量減衰係數는 Table 3과 같다. 管電壓에 따라 實驗적으로 決定된 有效에너지는 Table 4와 같다.

4-2. 照射線량에 따른 黑化度 決定

감마線스펙트럼 혹은 線束密度가 잘 알려진 放射線場이나 또는 各 에너지區間에 相當하는 放射線源을 利用하여 필름을 照射하는 것이 가장 理想的인 것이다. 그러나 이러한 條件을 갖는 放射線場이나 放射線源을 利用할 수 없는 상황아래에서는 各 에너지區間을 代表할 수 있는 線源을 選擇하여 필름을 校正하는 것이 普通이다.

이 報告書에서는 앞에서 구한 有效에너지의 X線을 利用하여 필름을 照射하였다. 有效에너지는 49 keV, 154 keV 및 256 keV를 選擇하였으며 Table 4에서 보듯이 이에 해당하는 管電壓은 各 90 kVp, 190 kVp, 및 280 kVp이다. 또한 600 keV 에너지區間을 代表할 수 있는 線源으로는 Cs-137의 감마선을 照射하여 線量에 따른 필름의 黑化度를 決定하였다.

照射線량은 500 ± 15 mR 과 $1,000 \pm 30$ mR 이었으며, 線量測定은 2次基準器를 使用하였다. 사용된 필름은 Kodak Type-III였으며, 조사후 이것을 68°F(20°C)로 유지되는 현상액 속에서 4분동안 現像하였다. 그리고 현상된 필름의 흑화도를 Photovolt 사 제품의 Densitometer(model 502 M)으로 判讀하였다.

Table 2. Specification of Absorbers

Peak Voltage of X-ray	~100 kVp	~150 kVp	~250 kVp	~300 kVp
Absorber	Al	Cu	Cu	Cu
Thickness(mm)	1.08	0.05	0.48	0.01
	2.00	0.1	0.77	0.29
	3.08	0.19	1.08	0.58
	4.05	0.29	1.46	0.98
	5.12	0.38	1.95	1.46
	6.20	0.48	2.93	1.95
	7.17	0.58	3.9	2.93
	8.20	0.77	4.98	3.9
	9.17	0.98	—	4.98
	10.25	—	—	—

* Densities of Al and Cu are 2.699 and 8.94 g/cm³, respectively.

Table 3. Mass attenuation coefficients

Energy (keV)	Unit: cm ² /g			
	Aluminium	Copper	Tin	Berryrium
10	26.3	224	141	0.593
15	7.93	74.2	47.0	0.300
20	3.41	33.5	21.3	0.227
30	1.12	10.9	41.3	0.181
40	0.567	4.89	19.4	0.165
50	0.369	2.62	10.7	0.156
60	0.280	1.62	6.53	0.150
80	0.203	0.772	3.02	0.140
100	0.171	0.461	1.68	0.133
150	0.138	0.223	0.614	0.119
200	0.122	0.157	0.328	0.109
300	0.104	0.112	0.164	0.0945

Table 4. Experimental effective energy of X-rays

Peak Voltage of X-ray (kVp)	Effective Energy (keV)
80	46
90	49
100	67
180	113
190	154
200	159
210	170
220	176
250	218
260	217
270	227
280	256
290	266
300	273

V. 結果 및 討議

이 實驗에서 決定되어 使用된 有效에너지와 理論的으로 計算된 에너지를 比較한 結果는 Table 5와 같다. 이 表에서 理論的 計算값은 式 (6)의 $I_0(E)$ 를 印加된 管電壓으로 固定해서 計算했는데, 實際로 實驗에서는 X線發生裝置의 電壓脈動이 存在하므로 理論値와 實驗値와는 어느정도 差가 發生한다. Kramer는 理論的으로 計算한 有效에너지와 實驗으로 決定된 값이 15%의 差를 보였으나, 이 實驗의 結果에서는 X線の 1차법만

을 測定할 수 있게 한것과 理論的計算에서, 固有필터의 減衰效果를 考慮하여 減소시켜 10%이내의 差를 보여주는 좋은 結果를 얻었다.

또한 50 keV에서부터 660 keV까지 X線 및 감마線에너지와 照射線量を 變化시키면서 各 필터區域別 黑化度變化特性(기울기)을 測定한 結果는 Table 6 및 7, 그리고 Fig. 2~5와 같다. Table 7의 結果를 式(13)에 代入하여 算出한 M 및 M^{-1} 은 다음과 같다.

Table 5. Comparison of experimental value with theoretical values of keV_{eff}

Peak voltage of X-ray (kVp)	Appr. Theoretical Energy keV_{eff}	Experimental Energy keV_{eff}	Ratio Theo./Exp. (%)
90	45	49	91.8
190	147	154	95.5
280	321	256	90.2

Table 6. Photographic density change in each filter region with varying X, γ -ray energy and exposure dose

Energy	Dose (mR)	Filter					Remark
		Cd(Sn)	Cu	Al	Pl	O.W.	
50 keV X-Ray	500	0.26	0.65	1.18	1.23	1.23	MCN-321
	1,000	0.30	0.89	1.53	1.59	1.60	MCN-321
150 keV X-Ray	500	0.48	0.60	0.63	0.63	0.61	MCN-321
	1,000	0.67	0.82	0.85	0.85	0.84	MCN-321
250 keV X-Ray	500	0.38	0.41	0.42	0.41	0.41	MCN-321
	1,000	0.52	0.57	0.58	0.57	0.56	MCN-321
600 keV γ -Ray	500	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	Cs-137
	1,000	0.43	0.42	0.42	0.43	0.43	Cs-137

Table 7. Slope change in each filter region with varying X and γ -ray energy

Energy	Filter				
	Cd	Cu	Al	Pl	O.W.
50 keV X-Ray	0.08	0.72	1.52	1.58	1.59
150 keV X-Ray	0.47	0.65	0.68	0.68	0.68
250 keV X-Ray	0.32	0.38	0.4	0.4	0.4
600 keV γ -Ray	0.2	0.2	0.22	0.22	0.22

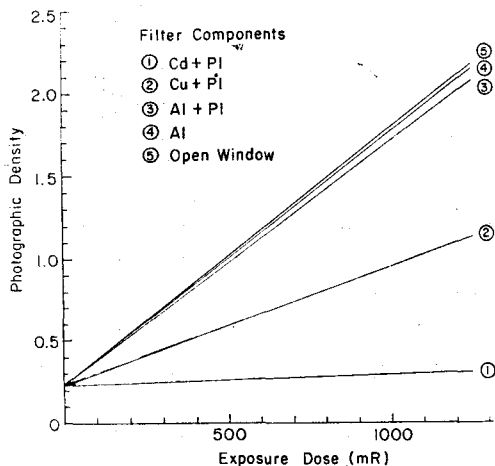


Fig. 2. Exposure Dose vs Photographic Density (50 keV)

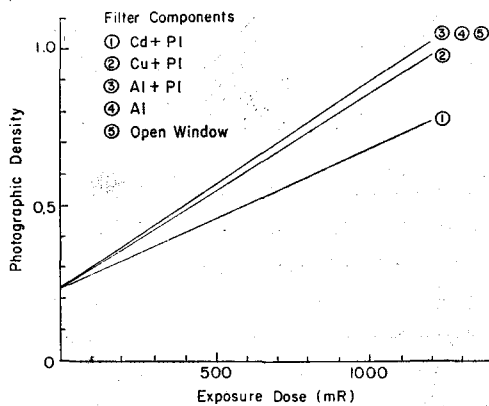


Fig. 3. Exposure Dose vs Photographic Density (150 keV)

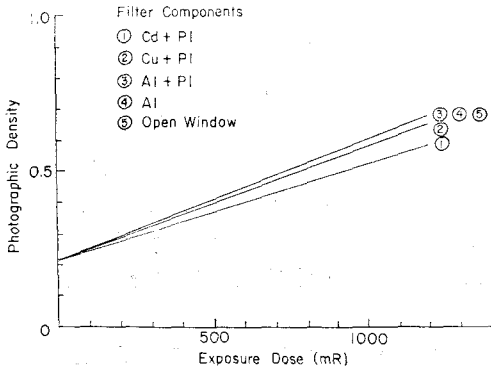


Fig. 4. Exposure Dose vs Photographic Density (250 keV)

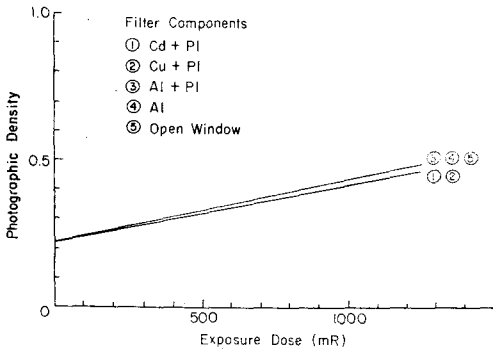


Fig. 5. Exposure Dose vs Photographic Density (660 keV)

$$\vec{M} = \begin{pmatrix} 0.08 & 0.47 & 0.32 & 0.20 \\ 0.72 & 0.65 & 0.38 & 0.20 \\ 1.52 & 0.68 & 0.40 & 0.22 \\ 1.58 & 0.68 & 0.40 & 0.22 \end{pmatrix}$$

$$\vec{M}^{-1} = \begin{pmatrix} 0.00 & 0.00 & -16.67 & 16.67 \\ -15.79 & -42.11 & 859.65 & -807.12 \\ 30.70 & 142.98 & -2,401.17 & 2,243.27 \\ -7.02 & -129.82 & 1,828.36 & -1,699.42 \end{pmatrix}$$

따라서 黑化度(R)만 필름으로부터 測定하면 各 에너지群별 個人被曝線量を 換算할 수 있다.

앞으로, 標準 X線照射施設을 利用하여 照射線量 및 測定の 正確度를 向上시키고, 에너지變化에 따른 필름 應答의 相對感度の 實驗의 決定, 潛像退行의 進行度等을 考慮한 測定結果와 本 線量解析方法에 의한 結果를 相互比較하여 正確度 및 精密度 向上을 위한 研究가 계속될 計劃이다.

참 고 문 헌

- 1) E. Tochilin R.H. Davis and J.: Clifford, ADP-78, 1948.
- 2) R. Baker and L.B.: Silverman, Nucleonics 7 (1):26, 1950.
- 3) L.A. Pardue, N.: Goldstein and E.O. Wollan, MDDC-1065, 1948.
- 4) L.J. Deal and F.H. Day, Am. J.: Roentgenol. Radium Therapy 59:731, 1941.
- 5) H.A. Kramer: Phil. Mag. 46:836, 1923.

**Determination of Personnel Exposures in the Lower Energy Ranges of X-Ray
by Photographic Dosimeter**

C. W. Ha, J. R. Kim and K. W. Suh

Department of Health Physics, Korea Advanced Energy Research Institute

= Abstract =

This paper described an improved technical method required for proper evaluation of personnel exposures by means of the photographic dosimeter developed by KAERI in lower gamma or X-ray energy regions, with which response of the dosimeter varies significantly.

With calibration of the dosimeter in the energy range from 30 to 300 keV, the beam spectrum was carefully selected and specified it adequately. The absorber combinations and absorber thickness used to obtain the specified X-ray spectra from a constant potential X-ray machine were determined theoretically and also experimentally.

A correlation between the density and exposure for the four separate energies, such as 49 keV_{eff}, 154 keV_{eff}, 250 keV_{eff} and 662 keV, is experimentally determined. As a result, it can be directly evaluated the exposure from the measured response of dosimeter.