

< 解 說 >

R.I. 測厚計의 特性

陸 鍾 澈*

漢陽大學校 工科大学 原子力工學科

1. 序 論

古里 1 號機 原子爐(PWR)의 稼動을 前後로 하여 우리나라의 工業技術의 發展은 飛躍的인 것이며 1977年에 100億弗 輸出이라는 一大工業國으로 登場하게 되었으며 80年代를 指向하는 우리의 理想은 物量的으로 豐饒할 뿐만 아니라 質的인 生産品으로 其所得을 驅歌할 때가 왔다. 따라서 製品의 原價切減을 爲해서나 國際競爭을 克服하기 爲해서도 製品 및 機器의 品質管理와 品質保障 問題는 必然的인 것이고 이 問題解決을 最近에는 放射線을 應用한 各種計測器와 非破壞檢査法을 利用하고 있음은 周知의 事實이다. 勿論 放射線追跡子(Radioactive tracer)도 利用되고 Radiography에 의한 비파괴 檢査(Nondestructive Testing)法 以外에 超音波探傷法, 磁粉探傷法, 渦流探傷法 等等 여러가지가 있으나 여기서는 主로 放射性同位元素를 利用한 各種測定器인 Gauges에 對한 內容解說을 爲主로 하고 紙面이 許諾하면 NDT인 RADIOGRAPHY에 對해서도 言及하고자 한다.

2. 測原計(Thickness gauge)

2-1: 原理와 構造

物體中(試材)의 放射線의 吸收로 인한 透過 및 散亂現象을 利用하여 物體, 特히 金屬材料의 두께를 測定하는 裝置가 Thickness gauge며 原理에 따라서 透過型과 散亂型(Backscattering도 包含)의 두가지가 되고 測定하는 對象試材에 따라 β 線 또는 γ 線을 使用하며 各種 金屬表面의 鍍金層의 두께를 測定할 때 螢光 X線을 使用하고 生産工程에 設置하여 On-Line으로 使用한다.

測定原理로서 物體內를 放射線이 通過할 때 其物體의 密度와 두께에 따라서 入射한 放射線은 吸收에 依한 其強度의 減衰가 生진다. 지금 物體에 入射하는 放射線의 強度를 I_0 , 透過된 放射線의 強度를 I 라고 하면

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \dots (1)$$

과 같이 되고 (1)式에서 μ =減衰係數 (cm^{-1}), x =試材의 두께 (cm)며 μ 는 放射線의 種類와 energy 및 試材의 密度에 따라서 決定되는 故로 I_0/I 即 入射線과 透過線의 強度의 比를 求함으로써 試材의 두께를 測定(x 를 測定)하게 된다.

(1)은 入射線束이 集束(Collimated beam)되어 있고 또한 試材의 두께가 얇을 때는 成立되나 넓은 入射線(Broad beam)일 때와 試材가 두꺼울 때는 適用치 못한다. 왜냐하면 두꺼운 金屬材 內에서 透過線束과 散亂線이 同時에 檢出器에 入射되기 때문이고 이때는 再生係數(Build-up factor) B 를 (1)에 導入하여

$$I = I_0 B \exp(-\mu x) \dots (2)$$

의 式을 使用해야 하며 이 B 의 값은 各種材料와 各energy에 따라서 다른 값을 나타내며 無次元數가 된다. Radiation-Protection에서는 $B = \text{Dose Build-up factor}$ 라고 하며 其線源의 Geometry에 따라서 또 μ 의 값에 따라서 다음 表 1과 같이 된다.

物體를 透過한 放射線 1個가 檢出器에 入射하여 i (Amp)의 電流가 흐른다고 하면 I_0 의 入射線에 對해서는

$$F(x) = i N_0 \exp(-\mu x) \dots (3)$$

의 電流인 感應函數 $F(x)$ 가 되고 N_0 는 全放射線個數가 되며 物體 即 試材의 두께가 變化하면 이에 對應하는 出力函數(感應函數)의 變化는

$$\frac{\partial F}{\partial x} = -i N_0 \mu \exp(-\mu x) = -\mu F \dots (4)$$

와 같이 된다. 即 두께 x 가 적을 때에는 그 두께의 微小變化인 Δx 에 對應하는 出力變化 ΔF 는 커지고 그 두께 x 가 두꺼울 때(늘때)는 ΔF 가 적어진다.

實際工場에서 設置한 가장 簡單한 例를 다음 그림 1

* 本學會 會長 및 國際放射線防禦學會 極東地域 代表理事

表 1. Dose Build Up Factors for Water, Iron and Lead

(a) Pointisotropic Geometry (μx)							(b) Plane monodirectional geometry (μx)						
MeV	1	2	4	7	10	15	MeV	1	2	4	7	10	15
Water							Water						
0.5	2.52	5.14	14.3	38.8	77.6	178.0	0.5	2.63	4.29	7.05	20.0	35.9	74.9
1	2.13	3.71	7.68	16.2	27.1	50.4	1	2.26	3.39	6.27	11.5	18.0	30.8
2	1.83	2.77	4.88	8.46	12.4	19.5	2	1.84	2.63	4.28	6.96	9.87	14.0
3	1.69	2.42	3.91	6.23	8.63	12.8	3	1.69	2.31	3.52	5.51	7.48	10.8
Iron							Iron						
0.5	1.98	3.09	5.98	11.7	19.2	35.4	0.5	2.07	2.94	4.87	8.31	12.4	20.6
1	1.87	2.89	5.38	10.2	16.9	28.3	1	1.82	2.74	4.57	7.81	11.6	18.9
2	1.76	2.43	4.13	7.25	10.9	17.6	2	1.69	2.35	3.76	6.11	8.78	13.7
3	1.55	2.15	3.51	5.85	8.51	13.5	3	1.58	2.13	3.32	5.26	7.41	11.4
Lead							Lead						
0.5	1.24	1.42	1.69	2.0	2.27	2.65	0.5	1.24	1.39	1.63	1.87	2.08	—
1	1.37	1.69	2.26	3.0	3.74	4.81	1	1.38	1.68	2.18	2.30	3.40	4.20
2	1.39	1.76	2.51	3.66	4.84	6.87	2	1.40	1.76	2.41	3.36	4.35	5.94
3	1.34	1.68	2.43	3.75	5.30	8.44	3	1.36	1.71	2.42	3.55	4.82	7.18

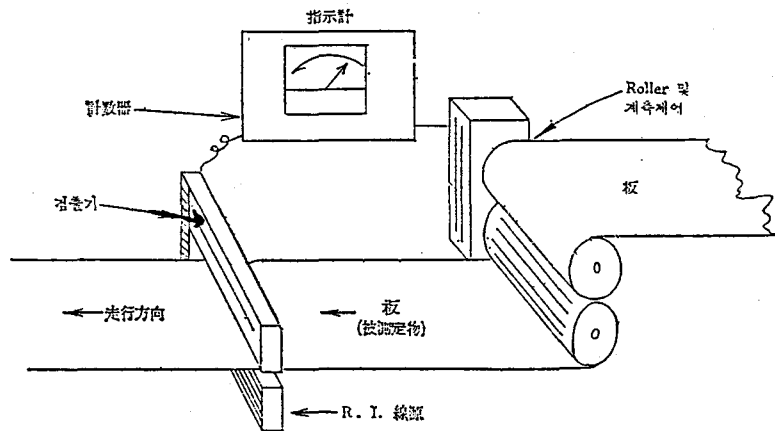


그림 1. Thickness Gauge 의 測定裝置

로서 例示할 수 있다.

散亂型 Thickness gauge 에는 β 線의 Backscattering 을 利用하여 各種被覆體의 두께를 測定할때와 γ 線의 Backscattering 을 利用하여 金屬被覆의 두께를 測定할 때가 있으며 β 線의 散亂에서는 物體의 두께가 두꺼울 수록 散亂量이 增加하고 어떤 一定值以上에서는 이 量이 飽和狀態가 되나 散亂線量은 物體의 原子番號(Z)가 클 수록 커진다. 例로서 β 線散亂量의 順序는 다음과 같다.

Au > Sn > Ag > Cu > Al 의 順이 되며 이 散亂型의 簡

單한 例는 그림 2와 같다.

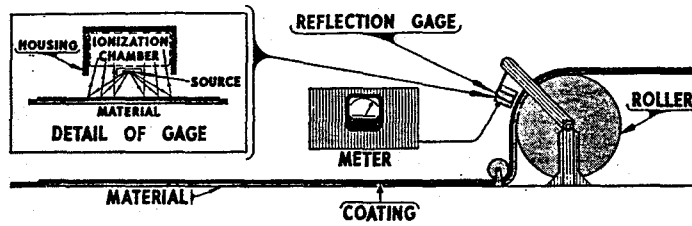
γ 線散亂型에서 Compton 散亂으로 物體에 入射하는 γ 線의 Energy 를 $E(\text{MeV})$, 波長을 $\lambda(\text{cm})$ 라고 하면

$$E = \frac{1.24}{\lambda} \times 10^{-10} \dots (5)$$

와 같은 關係가 成立하고 入射 γ 線의 波長 λ 와 散亂角 ϕ 方向의 散亂 γ 線의 波長을 λ' 라고 하면

$$\lambda' - \lambda = 0.243(1 - \cos\phi) \dots (6)$$

의 關係가 成立한다.



ADVANTAGES:

- 1-CAN MEASURE THICKNESS OF COATING AND/OR MATERIAL
- 2-MEASUREMENT MADE FROM ONE ACCESSIBLE SIDE
- 3-CAN MEASURE A VARIETY OF MATERIALS WITH ONE CALIBRATION

USAEC-10-220

그림 2. 散亂型 (Backscattering) thickness gage

(3)식에서 $F =$ 檢出放射線량이 되고 $F_0 = iN_0$ 가 되어 $F = F_0 \exp(-\mu x) \dots (7)$

라고 表現할 수 있으며 F 值에는 雜音이 混入하여 測定 誤差를 가져온다. 따라서 이 誤差를 分析 檢討하면 다음과 같다.

(1) 統計遙動誤差: 이는 放射線源에서 放射하는 放射線량의 統計의 放出誤差에 起因되며 被測定(x)에서 (Δx) 의 統計의 誤差가 生길때 다음과 같은 式이 成立된다.

$$(\Delta x)_{stat} = \sqrt{\frac{2\langle q \rangle \{1 - (\sigma_q / \langle q \rangle)^2\} \langle F \rangle}{RC}} \times \left(\frac{1}{\frac{\partial F}{\partial x}} \right)$$

$$\approx \sqrt{\frac{2\langle q \rangle \langle F \rangle}{RC}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)} \dots (8)$$

여기서 $\sigma_q = q$ 란 電流遙動值의 標準偏差, RC 는 이 回路의 time constant 다.

(2) 定數形誤差: 檢出器나 測定回路에서 생기는 檢出量에 無關한 雜音에 起用하는 誤差로 其雜音成分을 $\Delta\beta$ 라고 하면

$$(\Delta x)_{const} = \frac{\Delta\beta}{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)} \dots (9)$$

(3) 比例形誤差: 檢出器나 電子回路에 들어오는 雜音中 信號成分에 比例하는 量으로서 檢出系의 感度變化로서 나타나는 雜音에 起因되는 誤差로 比例定數를 α 라고 하면

$$(\Delta x)_{prop} = \frac{\alpha F}{\left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)} \dots (10)$$

과 같이 된다. 이 α 는 溫度와 關係되고 $\alpha = \frac{10^{-3}}{10^\circ C}$ 程度 일때 其回路는 安定성이 維持된다.

(4) 函數型誤差: (7)식에서 表現된 特性函數 其自體

의 變化를 받을때 이 線源, 檢出系의 幾何學的 配置나 放射線束의 變化等에 起因한다고 生覺되며 皮上의 吸收係數의 變化로서 表現된다. 지금 μ 의 變化值가 $(\Delta\mu)$ 라고 하면

$$(\Delta x)_{func} = \frac{\Delta\mu}{\mu} (x) \dots (11)$$

上記 (8), (10)式으로 나타낸 것은 特性函數 F 에 依하여 變化하므로 (7)式에 이를 代入하면

$$(\Delta x)_{stat} = \sqrt{\frac{2\langle q \rangle}{RC \cdot F_0}} \cdot \frac{\exp \frac{\mu x}{2}}{\mu} \dots (12)$$

$$(\Delta x)_{const} = \frac{\Delta\beta}{F_0} \frac{\exp(\mu x)}{\mu} \dots (13)$$

$$(\Delta x)_{prop} = \frac{\alpha}{\mu} \dots (14)$$

과 같이 되어 $(\Delta x)_{stat}$ 와 $(\Delta x)_{const}$ 는 檢出效率을 높여 使用하는 RI 의 放射能을 增加시켜서 F_0 의 값을 크게 하면 두 값은 적어지고 이들 條件을 一定하게 하면 測定 두께 x 일 때 誤差를 最少로 하는 吸收係數 μ_{opt} 이 存在하여 各各 다음과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} \mu_{opt} &= \frac{2}{x} \dots (\Delta x)_{stat} \text{ 最少로 됨} \\ &= \frac{1}{x} \dots (\Delta x)_{const} \text{ 最少로 됨} \end{aligned} \right\} \dots (15)$$

(15)의 結果에서 放射線透過形 Thickness gauge 의 最適 吸收係數 (μ_{opt})를 가진 放射線을 使用함이 가장 適切하고 이때

$$\mu_{opt} \cdot x = 1 \sim 2 \dots (16)$$

가 됨을 알 수 있으나 實際 其實測範圍는

$$\mu x = 0.5 \sim 4 \dots (17)$$

程度가 適當하다. $^{90}Sr - ^{90}Y$ β 線源 ($\mu = 0.00075 \text{ m}^2/\text{g}$), ^{85}Kr β 線 ($\mu = 0.003 \text{ m}^2/\text{g}$) 및 ^{147}Pm β 線 ($\mu = 0.015 \text{ m}^2/\text{g}$)

때 統計遙動誤差 $=4 \times 10^{-4}$, 定數形誤差 $=1 \times 10^{-4}$, 比例形誤差 $=5 \times 10^{-4}$ 가 되고 誤差의 크기는 同一한 두께 (g/m^2)에 다음과 같은 크기의 順位가 된다.

$^{90}Sr - ^{90}Y > ^{85}Kr > ^{147}Pm$ (但 μ 는 各各 다름)

2-2: β 線透過形 測厚計

β 線은 γ 線에 比하여 透過力이 적고 吸收係數가 크므로 各種 紙類, Plastic film, Vinylo, 金屬薄板 等 얇은 材料를 測定하며 現在 使用되고 있는 β 線源은 ^{14}C , ^{85}Kr , ^{90}Sr , ^{147}Pm , ^{204}Tl 等이고 其 energy는 大略 $0.039MeV \sim 0.77MeV$ 程度의 것이 된다.

2-2-1: 檢出器

β 線 檢出에 感度가 높은 것이어야 하고 또한 높은 β 線 量일 때도 測定할 수 있어야 하며 分解時間(Resolving time)이 짧고 檢出感度의 經時 및 溫度變化가 적은 것이 要求된다. 現在 이들 觀點에서 볼때 Halogen-Ar 氣體를 封入한 電離函이 널리 使用되고 Ar-9cmHg, Ethanol=1cmHg 氣壓으로 混合된 氣體의 전리함어 市販되고 있다. 이들 氣體는 電子사태를 防止하는 quenching 役割을 함으로서 quenching gas 라고도 하며 Internal quenching 이 된다.

G-M tube 도 이들 氣體를 封入하고 있으며 Tube 外部에 高低抗($\sim 100M\Omega$)을 넣어서 External quenching 作用을 시키기도 한다. 전리함의 特性은 封入 gas의 種類, 壓力, 電極構造(陽, 陰極)材質等에 따라서 變하며 RC-time constant 와 Ion 을 集電하는 Collector(anode)의 半徑 및 Cathode 와 Collector 거 리에도 關係 된다. 이는 다음 式으로도 알 수 있다.

$$v(t) = \ominus \frac{Ne \ln \{ 2V\mu / [r_1^2 p \ln(r_2/r_1)] + 1 \}}{2C \cdot n \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \dots \dots (18)$$

上記式에서 N =容積當每秒當 生成된 Ion 數, e =電荷, V =印加電壓, μ =易動率 (cm/sec) ($volt/cm$) $^{-1}$ (mmHg), p =壓力, r_2, r_1 =Collector 線 中心에서 檢出器 陰極까지의 거리(半徑) 및 陽極(Collector)의 半徑이다. 또 C =等價容量(檢出器의 容量과 人力回路的 並列容量을 合한 값)이다.

上記의 (Δx)의 變化를 적게 해야 其 測定回路的 安定性이 維持되어 測定誤差가 적어져서 精密度와 品質管理에 有用될 것이고 結果的으로 G-M tube 檢出器일 때에는 出力 pulse 電壓 $v(t)$ (18式)의 變動率이 적어야 하며 이 pulse 는 他檢出器보다 큰 점이 長點이다.

一般的으로 β 線 1個로 因한 檢出器內 生成된 電荷는 $q=10^{-15}Coulomb$ 이고 印加電壓 $=50 \sim 300V/10^{-9} \sim 10^{-10}Amp$ 며 (10式)에서와 같이 安定性으로 $\alpha=10^{-3}/$

$10^\circ C$ 의 값을 가진다.

檢出器系統의 安定性에도 또한 問題 되는 것은 檢出器와 RI-Source 사이의 거리가 되고 이 사이의 거리를 lcm 라고 하면

$$t_{air} = 12.9 \times l \text{ g/m}^2 \dots \dots \dots (19)$$

의 空氣層이 存在하고 被測定物의 두께는 實際로 이 t_{air} (19式)를 加算한 두께를 읽게 되는 것이고 특히 水分含有量이 많은 紙類의 두께 測定에서는 問題視된다.

따라서 試材와 Source 사이의 間隔은 可能한限 짧게 해야 함은 (19式)에서 l 를 짧게 함이 되어 t_{air} 의 두께가 적어져서 誤差가 적게 된다.

空氣의 密度는 周圍의 溫度和 氣壓에 따라 銳敏하게 變化하므로 t_{air} 가 變하며 (10式)의 比例形誤差의 要因이 된다. 例로서 (19)의 $l=5cm$ 라고 할 때 比例形誤差의 常數는 Source 를 ^{85}Kr 로 할때 $-6.4 \times 10^{-4} (^\circ C)^{-1}$ 로 되고 이로 因한 比例形誤差는 $-0.21 (g/m^2) \cdot (^\circ C)^{-1}$ 로 된다. 이와 같이 두께가 얇을 때는 空氣의 密度變化가 計器의 指示誤差에 影響을 미치므로 이를 際去하기 爲해서 l 를 적게 해야 하나 萬一 被測定物이 높은 溫度를 가진 金屬板(熱間壓인 板)일때 檢出器自體가 加熱되므로 이를 消去하기 爲해서 冷却水로 檢出器를 冷却시켜 주어야만 된다.

2-2-2: 安定性維持의 附加裝置

(1) 溫度補償法

上記의 같이 溫度問題를 解決하기 爲해서 溫度보상 법이 있다. 即 α_{air} 는 氣溫과 氣壓의 函數이므로 氣溫은 熱電雙의 溫度計로 測定하여 電子回路로서 두께指示信號에 補正을 하고 한편 氣壓에 對해서는 適當한 周期로서 自動校正을 하여 測定物없이 空氣層 單의 두께에 對應하는 放射線檢出量이 恒常 一定하게 되도록 gain control 을 해주는 방식이 實用化 되어 있다. 이 방식의 系統을 그림 3으로 表示한다.

그림 3의 방식은 急激한 氣壓變化에는 추종이 잘 되지 못하나 다른 방식(以下)에 比하여 單一 Source, 單

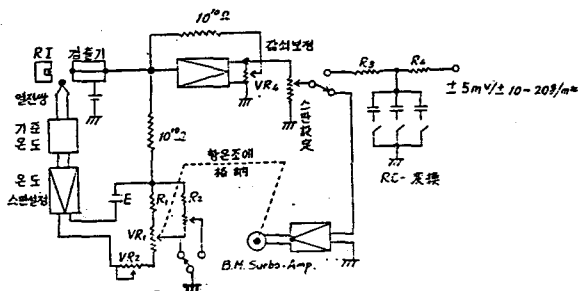


그림 3. 온도보상형 β 線測厚計의 信號系統

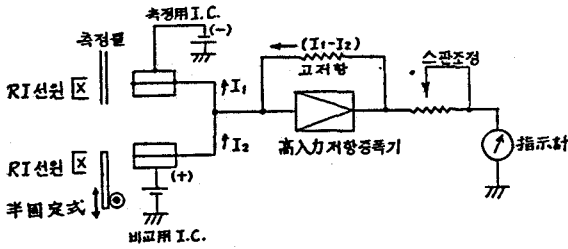


그림 4. 半固定式 測厚計

一檢出器라는 점이 有利하고 線源容器와 檢出器에 먼지나 異物質이 附着되어도 自動으로 校正 된다는 利點도 있다.

(2) 差動電離函形

回路的 安定性을 높이기 爲해 Source 와 전리함이 各 各 두雙 있고 한쪽은 標準두께用으로 比較用 Source 와 比較用 전리함이 있고 다른 쪽에 被測定用 Source 와 전리함이 있어서 雙方 전리함의 出力의 差를 取하여 두께를 표준치와 比較하여 읽는 方式이며 半固定式과 零位式差動形(Zero potential-Differential type) 測厚計가 있으며 이때 두雙의 Source-검출기의 Coupling 條件은 Source 의 強度(Activity), 거리, 구조및 出力 pulse 등이 同一해야함은 勿論이다. 또한 (19)式에서와 같이 t_{air} 가 同一해야 하며 전리함의 전리 gas 의 壓力, 溫度等이 또한 同一해야 한다. 半固定式에 대한 一例를 그림 4로 表示한다.

半固定式은 比較系의 可動標準物을 半固定으로 한것이고 測定할 두께를 x , 設定한 標準物의 두께를 x_0 라고 하고 이때 測定系 및 比較系의 特性函數를 F_m, F_r 이라고 하면 系全體에 對한 電離電流의 出力으로 表示한 特性函數 F 는

$$F = F_m - F_r = F_{m0} \cdot f_m(x) - F_{r0} f_r(x_0) \dots \dots \dots (20)$$

과 같이 되고 두 系의 F_{m0}, F_{r0} 를 同一하게 할 수 있는 故로 이를 F_0 라 하고 x 와 x_0 와의 偏差도 적다고 보고 이를 δx 라고 表示하면

$$F = F_0 \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x=x_0} \cdot \delta x \dots \dots \dots (21)$$

이 되며 두 系의 比例形雜音에 依한 效果가 같다면 比例形雜音은 F 에 比例 하게 되므로 比例形誤差(10式)는 다음과 같이 된다.

$$(\Delta x)_{prop} = \frac{\alpha F}{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)} = \frac{\alpha F_0 \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{x=x_0} \delta x}{\left(\frac{\partial F}{\partial (\delta x)} \right)} \dots \dots \dots (22)$$

即 單一 전리함形에 比較하여 $(\mu \delta x)$ 배가 되며 이때 $\mu \cdot \delta x < 1$ 이다.

그림 4의 高低抗은 大略 $10^{10} \Omega$ 程度고 現在 炭素被膜 또는 金屬氧化物 被膜形이고 溫度特性은 $500 \sim 2,000$ ppm 程度가 된다. 이 값은 溫度가 變하면 이 값이 比例形誤差의 比例常數가 되어 實用的인 온도변화인 $\pm 5^\circ C$ 에 對해서 10^{-2} 의 크기가 되어 單獨으로는 두께측정기로서 其性能을 發揮하지 못한다. 따라서 그림 3과 같이 高低抗器는 恒溫槽內에 넣어두어서 其溫度特性을 좋게 해준다.

差動전리함方式으로 하는 경우 고저항의 變化에 起因하는 比例形誤差는 (22)式으로 表示되어 單一 전리함方式과 比較하여 $(\mu \delta x)$ 배로 減少되고 實用的으로도 恒溫槽을 使用하지 않는 利點이 있다. 뿐만 아니라 전리함의 檢出感도도 전리 gas 의 壓力에 大略 比例하여 變하기 때문에 單一 전리함이면 전리함의 氣密이 重要視되나 투과력이 적은 低 energy β -線의 檢出에는 검출기의 방사선 入射窓의 두께를 적게 해야 하므로 技術的으로 困難해 진다 이 點도 차동전리함으로 하면 氣密性의 要求도 없어드는 利點을 가진다. 단 統計的 요동 (8式)을 보면

$$(\Delta F)_{stat} = \Delta(F_m - F_r)_{stat} = \sqrt{2} (\Delta F_m)_{stat} \text{ 또는 } \sqrt{2} (\Delta F)_{stat} \dots \dots \dots (23)$$

과 같이 되어 單一 전리함에 比해 其값이 커진다. 實際로 比較系의 信號는 자주 變動하지 않으므로 比較系의 전리함出力 측에만 Low pass-filter 를 넣어 比較系의 應答을 낮게 하여 比較系의 統計요동을 적게 하는 方式이 考察되어 實用化 되고 있다. 이 方式을 그림 5로 圖示한다.

參考로 零位方式은 (21), (22)式의 δx 가 零이 되는 方式이어서 比例形誤差는 除去된다고 보나 測定系가 複雜하다는 缺點을 가지고 있음을 指摘한다.

上記方法과 달리 Vibration Capacitance Converter (V. C. C)를 利用 하여 回路的 安定性을 期함도 있고 이는 다음과 같다.

一般的으로 전리전류(전리함의 出力)는 外部의 고저항($10^{10} \sim 10^{11} \Omega$)을 통하여 電壓降下가 생기고 A. C. 중

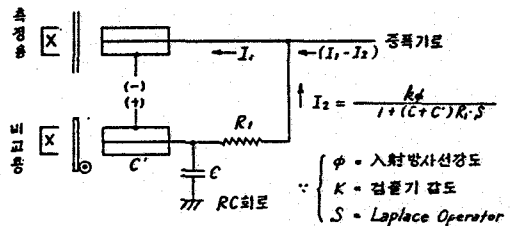


그림 5. 比較系의 통계요동 오차를 減少시키는 차동형 전리함 方式

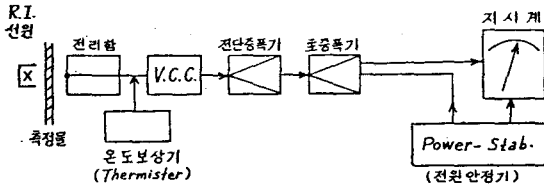


그림 6. V.C.C.가 挿入된 경우의 Block diagram

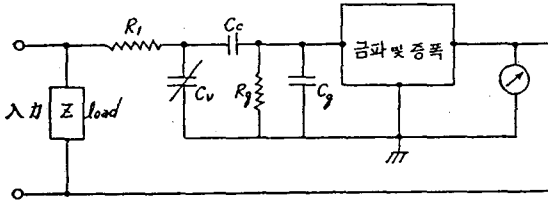


그림 7. V.C.C.의 回路圖

폭기를 使用하여 신호는 D.C.에서 A.C.로 Convert 할때 이 V.C.C.가 必要하다. 이 회로에는 2π -Type filter가 挿入되어 noise를 除去하고 100% D.C. feedback로 synchronized rectification 後에 input가 되게 했고 따라서 全體回路는 安定되며 기계적 진동에도 영향을 받지 않는 장점이 있으며 response time은 2sec 정도다. V.C.C.를 利用한 系統圖는 다음 그림 6, 7로 表示한다.

그림 7에서 入力信號에 依해 C_v 는 Charging 되고 兩極板에는 frequency f_0 로 진동시킨다. 이때 C_v 兩端에는 同一freq의 A.C.가 發生한다. R_1 은 진동주파에 대한 filter 저항이고 C_c 는 Coupling Condenser로 D.C.에서 A.C.成分만 통과시켜 검파 및 증폭기로信號가 전달되며 C_g 의 값은 大端히 적고 $R \cdot C_v, R_g \cdot C_v, R_g \cdot C_c \gg \frac{1}{2\pi f_0}, f_0=500c/s, R_1=R_g=200m\Omega, C_v=30pf, C_c=20pf$ 로 되어 있으나 固定値는 아니다.

(3) 溫度補償

그림 3에서 온도보상형 β 線測厚計의 構造를 圖示한 바 있으나 其補償前後의 特性曲線은 다음 그림 8-a, b와 같다.

온도變化의 主要原因中 전리함과 검출기의 고저항체에 서 오는 영향이 크며 온도계수는 $20^\circ C$ 때 $\sim 0.6\%$ 정도 이고 Thermister도 이 온도 보상에 利用되며 이는 $20^\circ C$ 때 $-3\%/^\circ C$ 의 온도계수를 가진다.

(4) 空氣보상

β 線測定計의 감도를 높여서 두께를 測定하면 방사선의 통계요동과 別途요동으로 인한 指示가 나타나며 이는 空氣密度變化에 起因하는 오차가 되고 이 보상에

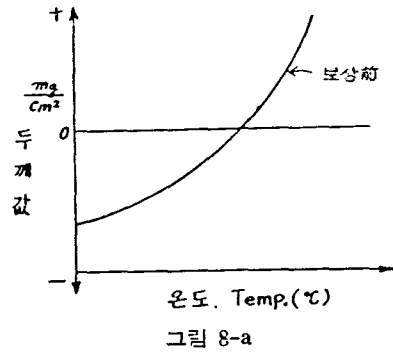


그림 8-a

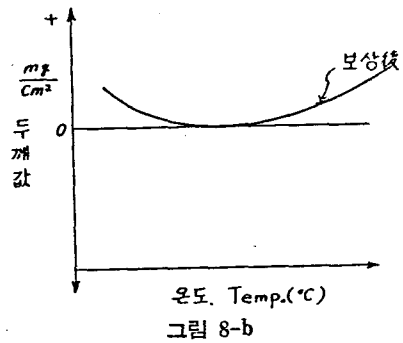


그림 8-b

보통 Blowing이라 하여 공기를 불어 넣어 주며 其效果가 있다. 이 Blowing은 Source-Detector 사이에 공기를 吹入시켜 줌으로써 指示의 요동成分이 減少한다. Blowing前과 後를 比較하여 約 $1.7g/m^2$ 의 差가 있음이 實驗으로 나타났다.

(5) 實用된 β 線測厚計의 一例

一般의인 β 線透過形 測厚計의 特性을 다음과 같은 表2로 例示한다.

實際測定 對象物中 plastic film이나 紙類等の 製造에서 其幅은 1m~10m까지도 있으며 其全體幅의 測定이 要求될 때가 많다. 이때 2m 이상인 넓은 幅測定에는 O形이동장치가 使用된다. 이는 RI-Source 용기 (Container)와 Detector를 各各 平行으로된 rail에 따라 移動하면서 測定하며 O形이동장치는 Space factor는 良好하나 Source와 Detector 사이의 相對的位置가 多少라도 틀리면 指示의 오차가 생기므로 이에 對한 細心한 注意가 必要하다.

이와 對照的으로 比較的 좁은幅의 測定物일 때는 C形이동장치가 使用된다. 이는 Source와 Detector를 堅固한 C形 flame으로 結合시켜 測定하므로 그 측정 폭은 2m 정도지만은 O形장치와 比較하여 구조가 간단하고 Scan 오차도 없고 保守에 便利한 點이 있다.

表 2. β 線透過形 測厚計의 一例

使用 R.I.	測定範圍
^{147}Pm	2~160g/m ²
^{85}Kr	5~1,000g/m ²
^{90}Sr	50~6,000g/m ²
測定面積	測定物幅
~50×140mm	1.4m 以下(C型移動장치 使用)
	1m 以上(O形이동장치 使用)
	移動장치 내용

	固定點측정	Scanning 측정	Profile 측정
Scanning 특設定	—	Limited Switch 付着電子式	전자식
移動속도 (표준)	9m/min	3m/min, 0.5~3m/min, 1~6m/min	3m/min, 0.5~3m/min 1~6m/min
移動장치	C形	C形, O形	C形, O形

* 電源=AC100V, 50/60Hz, 約 500VA

上記 表2中 Profile 測定이라 함은 測定物의 「幅方向의 두께變化」를 測定함이고 製造過程에서 幅方向의 두께變化를 管理하여 品質保證을 해주는 目的이고 이

Profile을 몇번 측정하여 其平均 profile을 얻어 測厚하는 gauge도 實用化되었다. 이 profile 測定用 測厚計는 RI-Source가 線狀이고 移動速度도 被測定物의 移動速度와 比例해야 하고 指示는 x-y Recorder를 使用하여 測定物의 幅方向을 x軸, 두께값을 y軸으로 記錄하여 이 profile이 視覺的이고 立體的이 되어 있다. 表2와 같이 一般的인 β 線透過形測厚計의 性能中 品質管理用 精密度는 다음의 表3과 같다.

3. γ -線 透過形測厚計

γ -X線은 一種의 電磁波이며 β 線에 比하여 其透過力이 強하여 各種金屬板의 熱問 또는 冷間壓延때 두께測定計로 使用 되고 γ 線의 energy에 따라 또 吸收物質에 따라 光電效果, Compton 散亂, 雙電子生成 (pair production)의 現象이 生기는 周知의 事項이고 實用的인 $\gamma(x)$ 線源은 ^{55}Fe , ^{60}Co , ^{109}Cd , ^{137}Cs , ^{147}Am 등이 있다.

3-1: 檢出系

β 線利用 두께측정기인 β Thickness gauge는 測定 두께가 얇아 측정 gap이 존재하여 空氣密度에 依한 측정 오차가 있었으나 γ 線 Thickness gauge는 測定두께가 두껍기 때문에 이 오차는 문제시 되지 않는다. 但

表 3. β 투과형 thickness gauge의 精密度

R.I. 使用선원	測定두께 (g/m ²)	5	20	50	100	160	참 고
^{147}Pm (50mCi)	短周期오차(2 σ 2 σ)	1.8	0.5	0.3	0.22	0.25	gap10mm
	長周期오차(10H 7°C)	1.4	1.1	0.44	0.23	0.15	RC=2sec
	Passline 오차($\pm 2\text{mm}$)	1.2	0.5	0.35	0.32	0.32	—
	Scan 오차	2.76	0.75	0.35	0.21	0.17	Scan 보정 없음
R.I.	측정두께 (g/m ²)	10	80	200	500	1,000	참고
^{85}Kr (40mCi~ 1,000mCi)	단주기오차(40mCi)	2.3	0.32	0.16	0.11	0.11	gap 15mm
	" (2 σ 2 σ)(1,000mCi)	0.89	0.13	0.10	0.05	0.05	RC=2sec
	장주기오차(10H 7°C)	2.25	0.30	0.15	0.10	0.05	—
	Passline 오차($\pm 2\text{mm}$)	0.76	0.33	0.33	0.33	0.33	—
	Scan 오차	2.76	0.37	0.18	0.10	0.07	Scan 보정 없음
R.I.	두께 (g/m ²)	200	500	1,000	3,000	6,000	참고
^{90}Sr 30mCi	단주기오차(2sec 2 σ)	0.38	0.2	0.1	0.07	0.12	gap 15mm
	장주기오차(10H 70°C)	0.52	0.22	0.12	0.06	0.05	RC=2sec
	Passline 오차($\pm 2\text{mm}$)	0.82	0.47	0.3	0.2	0.12	—
	Scan 오차	0.61	0.26	0.15	0.08	0.07	Scan 보정 없음

β -gauge의 검출기와 같이 測定物 厚의 溫度, 濕氣에는 영향이 있고 검출기의 종류, 구조에 따라서 영향은 다르다. 또한 γ 線은 투과력이 強하므로 其차폐문제 是 반드시 고려되어야 하며 Radiation Protection에 대한 各별한 注意가 要求된다. 大體로 Thickness gauge의 detector는 전리함이나 γ 線檢出에는 此外에 NaI(Tl)-Scintillator가 전리함形 검출기 보다 검출효율이 10倍以上 높으나 分解時間이 10^{-6} sec 程度고 安定度가 낮은 缺點을 가지고 있다. 이 安定度의 補正을 爲해서 γ 線變調方式이나 比較方式 등이 있으나 구조가 복잡하여 전리함을 代置하여 使用할 段階는 아니다.

전리함은 Ar, Xe gas를 數氣壓以上으로 해서 檢出 效率를 높이고 있으며 特別히 Xe을 封入한 전리함은 紙 energy $\gamma(x)$ 線에 對한 檢出效率는 大端히 높다. ^{241}Am 의 γ 線(60KeV)에 對해서는 30~60% 정도로 된다. γ 線 두께 측정計用 전리함의 一般의 特性은 다음과 같다.

檢出效率: $1 \sim 5 \times 10^{-12}$ Amp/(mR/h) (for ^{137}Cs - γ)

約 1~5%

30~60% (^{241}Am)

印加電壓: 50~500Voets

3-2: 信號의 處理

Detector에서 나온 出力은 (7)式과 같이 두께의 지수함수(Exponential function)이고 直線關係는 아니다 金屬工業, 主로 鐵鋼業에서 γ 線투과형 Thickness gauge를 壓延 Line이나 檢査 Line에 설치하여 結局 On-Line方式으로 使用하나 最近에 와서 壓延機는 自動 program, 檢査도 自動選擇機를 採用하여 Computer로 總合적으로 管理하게 되었다. 따라서 두께의 設定은 外部에서 設定信號를 받아서 設定되고 出力信號는 10進 서너자리 Digital方式이 많고 따라서 設定值도 이와 符合하는 方式이 要求된다. 現在 γ 線 투과형 Thickness gauge는 거의 10進 서너자리 Digital方式을 採用 하고 設定方式은 Log module을 使用한 對數化 回路方式과 Feed back ratio 設定方式이 主로 使用된다.

3-3: Low-energy γ 線의 吸收係數와 吸收體組織

Photoelectric effect(光電效果)가 현저히 나타나는 100KeV 以下の γ 線일 때 μ_{pe} 는 測定體의 原子番號(Z)의 5乘에 比例하니까 ^{241}Am 의 γ 線을 利用한 얇은 鋼板의 두께 測定에는 測定物인 鋼板의 組織成分의 影響을 充分히 分析하여 알고 있어야 한다. Low energy γ 線의 各種物質에 依한 吸收係數(cm^2/g)의 變化는 다음의 그림 9와 같다.

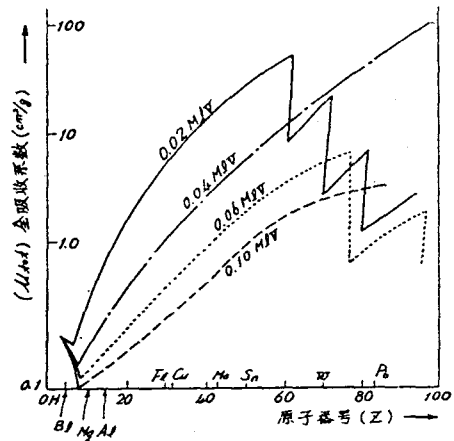


그림 9. Low energy γ 線의 吸收係數의 原子番號依存性

그림 9와 같이 被測定物의 組成 成分에 따라서 同一 energy 일때라도 其吸收係數가 다르며 따라서 (7)式의 μ 값이 變化하여 E란 檢出量이 달라진다.

吸收體의 吸收係數는 組成을 알면

$$\mu_{tot}/\rho = \sum_i (\mu_{tot}/\rho)_i \cdot \gamma_i \dots\dots\dots (24)$$

와 같이 되어 計算할 수 있고 여기서 $(\mu_{tot}/\rho)_i$ 는 i인 元素에 對한 全質量吸收係數고 γ_i 는 i인 元素의 重量成分比다.

3-4: γ -ray thickness gauge의 實用

γ 線 두께측정 gauge의 線源은 ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{241}Am 이 爲主가 되고 被測物이 鐵板이라고 할때 其使用 RI-Source가 Co나, Cs, Am나에 따라서 同一한 두께에 對해서도 其透過率(%)이 다르다. 即 Co때 約 90% 라면 Cs 때 80% Am 때 30%로 투과율이 떨어짐은 ^{241}Am 의 γ -energy가 0.027MeV, 0.03MeV, 0.06MeV로 낮기 때문이다. 따라서 ^{60}Co 나 ^{137}Cs 은 各各 (2.7~55)g/m², (2~40)g/m²의 測定範圍일 때 ^{241}Am 은 (400~3,500)mg/cm²로 (0.4~3.5)g/cm²의 範圍가 되고 있다.

^{137}Cs -Source로서는 鋼板일 때 0~120mm의 측정범 위고 應答性은 0.5~0.1sec, 精密性은 0.05mm~2mm가 된다. 測定條件은 熱間壓延工程일 때가 많고 물 冷却장치, 1000°C 以上인 測定物에서의 熱輻射에 依한 計器오차(온도특성)를 除去하기 爲한 보상장치, 工場內 惡環境에 對한 耐부식, 耐濕性, 耐진동性 등에 對한 對策도 講求되어야 한다. ^{241}Am -Source는 얇은 鋼板, 黃銅板 등의 두께 측정에 使用되고 鋼板의 두께는 0~6mm 측정에 適合하며 應答性은 0.1sec, 오차는 $\pm(1\sim$

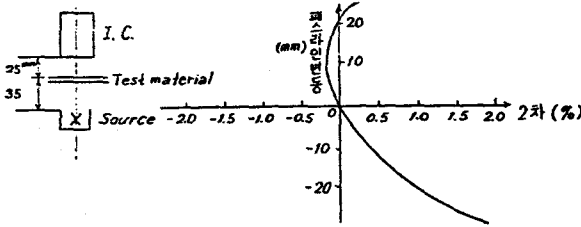


그림 10. 放射線 Thickness gauge의 측정범위의一例 (但 X-線=70kV 때의 實測例)

表 4. γ -線定數 (Γ)

R. I.	Γ
^{60}Co	1.35
^{137}Cs	0.33
^{45}Co	0.56
^{52}Mn	1.93
^{24}Na	1.89
^{22}Na	1.32
^{136}I	1.25
^{150}Br	1.50

20) μ 정도다. ^{241}Am 의 長點은 半減期가 458年으로 他 Source 보다 길다는 點이다. Source의 一般的인 具備 條件은 ① 半減期가 길것, ② 被測物의 材質, 두께에 적합한 energy를 가질것, ③ 比 gamma 定數(Specific gamma Constant)가 낮을것 등을 列擧할 수 있다. ③ 第項의 寸제는 Radiation Protection에 매우 主要한 要素가 되며, Dose-rate in rads per hour per curie at 1 meter (Γ)의 값으로 表示한다. 其값을 表示하면 다음과 같다.

表4로서 Γ 의 값이 높은 RI일수록 우리들 人體에 對한 防禦를 철저히 하여야 한다. 即 Source의 遮蔽를 철저히 하여야 하며 使用하는 周圍의 RI-標識物 및 出入制限의 標示, 환경방사선 관리를 爲한 monitor 즉 측정기기가 具備되어 있어야 하며 수시로 방사선량을 측정하여 들이 安全하다.

上記 Γ 의 값을 表示하는 基本式은

$$\Gamma = 19.3 \sum_i n_i(h\nu)_i \left\{ \frac{\mu_a}{\rho} \right\}_i \frac{mR}{mCi \cdot hr} \text{ at } 1m \dots\dots(24)$$

로 되고 n_i 는 $(h\nu)_i$ 의 energy를 가진 photon數, $\Sigma(h\nu)$ 는 방사능붕괴당 生性되는 全體 photon energy

(MeV)이고, $\left\{ \frac{\mu_a}{\rho} \right\} = \mu_m$ 은 質量吸收係數다.

^{241}Am 은 얇은 金屬板측정용 뿐만 아니라 小容量 容器의 內容物檢査用으로도 使用된다. 即 dia=5.2cm의 小形 筒조립 罐筒의 內容量을 $\pm 1\text{mm}$ 程度의 精密度로 其 Level(液面 또는 準位)을 測定하는데도 使用되고 있다.

3-5: Thickness gauge 使用上 留意해야할 點

① Source로서는 勿論 μ 線, γ 線, X線의 3種이 있고 測定方式에 따라 투과형, 散亂形이 되겠지만 RI 使用 때는 各核種에 對한 特性 即 半減期, energy, 被測定에 對한 吸收係數(그림 9), 두께의 範圍 등을 考慮하여 選擇을 해야 하며 가령 測定範圍의 一例를 들면 다음 그림 10과 같다.

測定範圍는 RI 使用인 경우 투과형으로는 Source의 半價層의 約(0.2~5)배의 두께이고 산란형일 때는 약 (0~1.5)배의 두께까지 된다. X線인 경우 管電壓에 따라서 其範圍가 自由로이 變更되나 現在 40,000mg/cm² (鋼材때 約 50mm)가 最大值며 그림 10으로 圖示 되었다. 同一한 測定範圍에 있어서 RI 使用일 경우와 X線 使用일 경우의 各各 其長點, 短點을 整理補하고 目的, 用途에 따라서 區別할 必要가 있다. 가령 放射線 energy의 物質吸收는 β 線일 때 被測定物質의 差로 因한 영향은 적고 核種이 가진 最大 energy의 約 1.4乘에 逆 比例하나 X線, γ 線일 때는 測定材料의 原子番號(Z)의 3乘에 比例하므로 鋼板 表面에 汚, 기름 등이 있을 때 壓延 Line에서 X線, γ 線일 때는 이 영향이 적으나 測定材料의 密度變化가 精密度上 문제가 될 때에는 β 線이 더 좋다.

gauge機種 選擇에 있어서는 以上과 같은 문제 以外에 精密度 維持를 爲해서 gauge의 設置條件, 안전성, 보수성, 경제성 등 종합적인 검토後에 決定해야 할 것이다. 自動制御를 하는 경우 gauge의 制御性 向上을 爲해서 應答성이 좋은 X-線 使用과 Time Constant (RC)가 적어야 된다.

② 構造에 있어서 堅固하고 耐震, 耐熱, 防水油의 구조가 必須條件이되고 detector部가 Line上에 設置되기 때문에 이 必要性이 크다. detector와 被測定材 사이의 衝突문제도 考慮해야 하며 材料板의 破斷 및 휨으로 因하여 검출기와 충돌할 염려도 있는 것이다. 따라서 設置할 때 검출部 앞쪽에 guide guard cover를 設置함이 좋다.

水, 油滴의 영향: 壓延時에 冷却, 潤滑을 위해 多量의 水, 기름을 使用하는 關係上 검출부周圍에 mist가 飛散하고 壓延 role 近方은 高溫多濕 狀態가 된다.

gauge를 長期間 使用하면 間隔的으로 其性能을 比較 檢査해야 하며 조임쇠 고무바킹등의 老化, Connector의 防水處理不良, mist 浸入에 依한 絶緣不良, Short 短絡에 依한 燒損事故도 고려해야 하고 특히 X線의 檢출部에는 高壓 變壓器를 內藏하고 있어서 더욱 注意해야 하겠다.

③ 熱的 영향: 熱間延 두께 측정인 경우 被測材의 온도는 1,000°C前後의 高溫인 경우도 많다. 이때 고온으로 因한 檢출기, 전치증폭기 등은 측정 오차를 나타낸다. (그림 8-a) 뿐만 아니라 熱的 영향은 전기部品の 수명단축 및 고장을 일으키는 要因이 되므로 檢출部 flame을 防熱板으로 被覆하든지 水冷 空冷을 해주어야 하며 Pre-Amplifier(전치증폭기)를 檢출部에 內藏하지 않고 別途로 두는 것이 좋다. 또한 信賴性, 保守性 向上을 위해 이 증폭기는 集積回路를 使用하고 Module amplifier를 使用하여 drift를 減少시켜 준다.

精密度維持문제: 鋼板이 傾斜된 때의 오차가 되고 鋼板인 被測材는 방사선 Beam 方向에 대하여 恒常 直角 方向이러야 하며 强판경사角이 크면 오차도 물론 커진다. 이는 角度오차率이 되고 $\eta_0 = \frac{t' - t}{t} \times 100$ 으로 表示하고 t = 被測材의 두께 t' = 방사선 Beam 方向의 被測材의 두께다.

④ Pass-line의 變動으로 因한 誤差: 上記의 被測材와 방사선 Beam과의 相對角度가 一定하다고 해도 被測定材가 通過하는 Pass-line의 變動으로 鋼板을 測定할 때 其오차가 문제시 된다. Pass-line이 變動하면 방사선이 散亂되어 其오차가 생긴다. Source에 따라 이 오차는 다르며 即 β - γ 線源에 比하여 X線을 使用하건 이는 點線量이 比較의 높아서 測定 Beam을 Collimation시킬 수 있고 X線發生器와 上部檢출기와의 距離를 길게 取할 수 있는 利點이 있어 그 오차는 相對的으로 적어진다. 이 Pass-line變動에 依한 오차는 다음 그림 11과 같다.

⑤ 校正曲線의 經年變化: 被測材는 標準材와 比較하여 校正曲線으로 調整하게 되어 이 校正曲線은 長期間 不變이라야 한다. Analog式을 使用하고 있지만 其結果는 不變은 아니다. 그림 12와 같이 두가지 경우에서 ①의 경우는 ②때 보다 變化率(%)이 +值로 더 많으며 板의 두께가 두꺼울수록 其 變化率은 적다. 主要因은 Source의 減衰, 전리함特性의 變化, 電壓의 變化, 設定用 Potentiometer의 磨耗 등이 되나 主로 放射線吸收 特性이 반드시 指數函數로만 表示되지는 않는다는 데도 其原因이 있고 또 設定回路의 抵抗變化와 Scale의 Shift에도 原因이 있다.

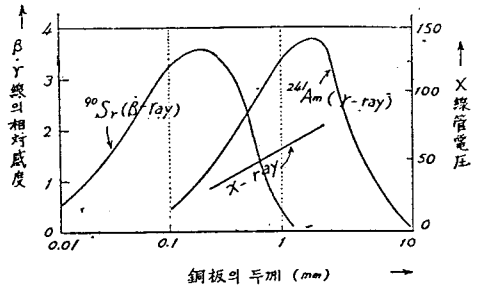


그림 11. Pass-line에 依한 오차 (^{241}Am 300mCi γ 線 Thickness gauge)

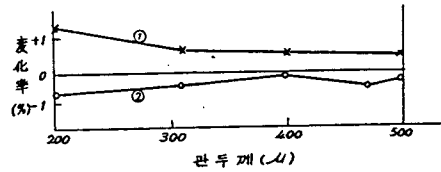


그림 12. Analog式 gauge의 校正曲線의 經年變化(約 10個月經過)

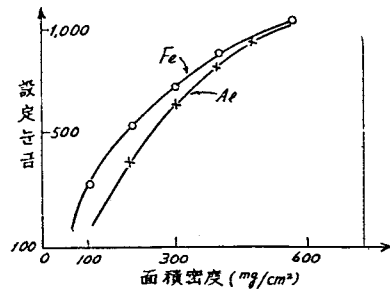


그림 13. Fe와 Al의 校正曲線

⑥ 校正用 標準片: 標準片의 選定方法, 保管方法, 基準板두께의 測定方法, 材質 및 保管中 其經年變化의 程度등을 考慮해야 하며 標準自體의 두께測定이 가장 重要한 문제다. 이 標準片의 精密度가 要求 된다. 이 基準板두께의 決定은 主로 一定한 面積의 重量測定에서 換算하는 方法을 使用하고 被測材와 標準片의 材質이 同一할 것이 要求되고 鐵片 등은 保管中 녹이 슬지 않게 해야 하고 Stainless Steel, Aluminum의 標準片인 경우 其面積密度(mg/cm^2)만의 換算으로는 안되며 鐵과 代用材質의 두 曲線에서 鐵과 等價한 두께를 求할 必要가 있다. 即 그림 13으로 表示된다.

4. 散亂形 測厚計

4-1. 散亂形 Thickness gauge의 特性函數

이 gauge는 방사선을 被測材에 入射시켜 被測材에

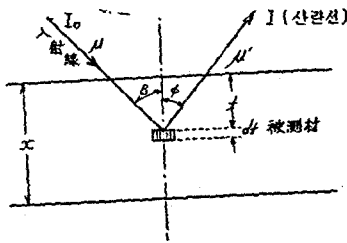


그림 14. 산란형 gauge의 原理

依한 散亂線을 測定하여 두께를 測定하는 것이고 其原理는 다음 그림 14와 같다.

그림 14에서 다음과 같은 식이 成立한다.

$$I = \int_0^x I_0 \exp\left\{-\mu \frac{t}{\cos \theta}\right\} \cdot \beta \cdot \exp\left\{-\mu' \frac{t}{\cos \phi}\right\} dt$$

$$= I_0 \left\{ \frac{\beta}{\left[\frac{\mu}{\cos \theta} + \frac{\mu'}{\cos \phi} \right]} \left(1 - \exp\left\{-\frac{\mu}{\cos \theta} x\right\} + \frac{\mu'}{\cos \phi} x \right) \right\} \dots \dots \dots (24)$$

여기서 x 는 被測物의 두께, μ, μ' 는 入射 및 散亂放射線의 吸收係數, β 는 被測材의 單位길이當 放射線의 散亂確率이다.

被測材의 두께가 充分히 두꺼울 때 I 는 一定值에 收斂하여 이를 I_{sat} 라고 하면

$$I_{sat} = \frac{I_0 \beta}{\left(\frac{\mu}{\cos \theta} + \frac{\mu'}{\cos \phi} \right)} \dots \dots \dots (25)$$

로 되어 I_{sat} 란 I 의 飽和值가 되고 飽和背後散亂量 (Saturated Backscattering Quantity)이라 하고 實際로는

$$x_{max} = \frac{3}{\left(\frac{\mu}{\cos \theta} + \frac{\mu'}{\cos \phi} \right)} \dots \dots \dots (26)$$

가 되고 (26)式 x_{max} 때 (24)式의 I 는 飽和值가 된다.

特徵으로서 (26)式의 $\left(\frac{\mu}{\cos \theta} + \frac{\mu'}{\cos \phi} \right)$ 의 값은 두과形의 μ (16式 17式)에 該當함을 알 수 있다. $\theta, \phi=0$ 가 되고 使用할 경우가 많고, μ 와 μ' 값의 差異도 적어서 同一 Source를 散亂形으로 使用하면 두과형에 比하여 檢보기 吸收係數가 2倍가된 特性으로 되고 측정범위도 두과형의 $\frac{1}{2}$ 로 되어 많은층을 측정함에 便利하다. 그림 14에서 알 수 있는 點은 산란形때 被測材의 한쪽에서 其두께를 測定할 수 있으므로 Tank, 船舶 및 建造物의 壁等과 같이 한쪽에서만 其두께를 측정할 수 있는 物體에 應用할 수 있다. 또한 이 形의 큰 特徵은 母體基板위에 他金屬物質로 도금되어 있는 表面層만의 두

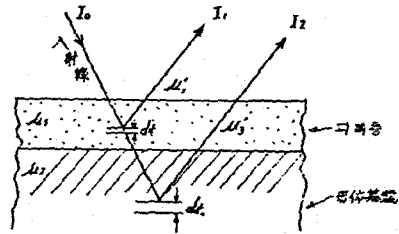


그림 15. β 線散亂形피복物 두께측정 Model

께測定에 利用된다는 點이다.

4-2 β -線 film thickness gauge:

β -線을 利用하여 各種 被覆層의 두께를 測定하는 것이고 散亂形이며 其特性 函數와 그림(model)은 다음과 같다. 그림 15의 被覆層 model에 對한 特性函數를 計算하면

$$F = I_0 [K \{1 - \exp(-\nu x)\} + \exp(-\nu x)] \dots \dots \dots (27)$$

과 같고 I_0 는 母體基板이 있을 때의 入射線量이고 여기서 飽和 Saturation back-scattering-放射線量은 各 I_1, I_2 가 되고 $\mu_1 + \mu_1' = \mu_2 + \mu_2' = \nu$ 가 된다.

(27)은 近似式으로 하면 다음과 같다.

$$F = I_{sat} [1 - \exp(-2x/x_{1/2})] \dots \dots \dots (28)$$

여기서 $x_{1/2}$ 는 β 線의 半價層(H. V. L.)이다. 亞鉛鍍金屬層의 두께測定, 鋼板의 鍍金屬 측정에는 Source로서 $^{90}\text{Sr}, ^{85}\text{Kr}$ 의 β 線의 散亂을 利用하며 現在 螢光 X線을 利用하는 方法도 使用되며 이는 ^{241}Am 에서 放出되는 特性 X線(Zn K X線)의 強度를 比例計數管으로 測定하여 其피복층의 두께를 얻는 方法이다. 다음 그림 16은 이 關係를 圖示한 것이다.

그림과 같이 螢光 X線일 때는 ^{90}Sr 때 보다 두께變化

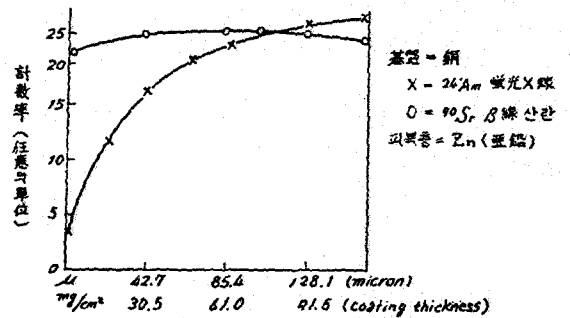


그림 16. Zn-피복층의 두께와 β 線散亂 및 螢光 X線量과의 關係

에 對한 計數率의 變化가 크다는 것을 알 수 있다. 더 詳細한 說明은 뒤로 미루겠다.

4-3. γ 線散亂形 Thickness gauge

γ 線散亂에 대한 特性函數는 (24)式에서

$$I = I_0 \frac{\sigma_c + \sigma_{coh}}{\mu + \mu'} [1 + \exp(-(\mu + \mu')x)] \dots\dots\dots (29)$$

와 같이 되고 其飽和後方散亂量은

$$I_{sat} = I_0 \frac{\sigma_c + \sigma_{coh}}{\mu + \mu'} \dots\dots\dots (30)$$

과 같이 表現된다. 여기서 σ_c 는 Compton Scattering의 吸收係數, σ_{coh} 는 入射 γ 線과 散亂線과 干涉된 Wave 로 因한 Coherent-Scattering에 依한 吸收係數다. 또한 μ, μ' 는 入射 및 散亂線의 吸收係數고 光電效果·Compton-Scattering, Pair Production(電子雙生成)에 依한 吸收係數의 合이다. 이들은 γ 線의 energy와 散亂體인 被測物의 原子番號가 따라서 變化する다. ^{241}Am 의 散亂量은 物質에 따라서 다르고 그 相違點은 다음 그림 17과 같다.

그림 17의 特性에서도 β 線散亂形 때와 같이 γ 線으로도 두 金屬層인 皮복層의 두께를 選擇적으로 測定할 수 있음을 나타내고 있다. 이 ^{241}Am γ 線의 散亂을 利用하면 輕合金일 때 2~9mm, Plastic 때 3~20mm의 두께로 比較的 얇은 物體의 두께를 測定하는 데 適當하다. 但 鐵, 鋼과 같은 原子番號가 높아지면 散亂線이 測定物內서 吸收되어 減衰하므로 測定範圍에 大端히 적어진다.

低 energy X線을 合成纖維의 가는 실에 入射시켜 直角方向에 散亂되는 線量을 전리함으로 測定하여 1,000~4,000 denier(1denier=1.1 $\mu\text{g}/\text{cm}$)의 굵기에 대해 ^{125}I , 50mCi를 使用하여 1~2%의 精密度와 RC=

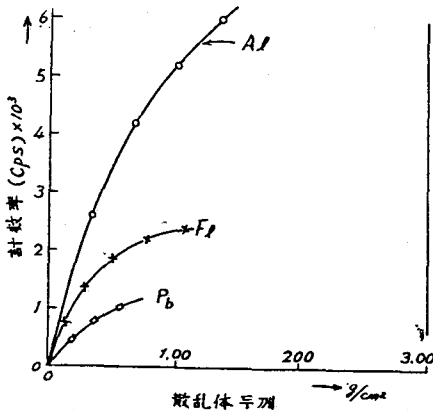


그림 17. ^{241}Am γ 線의 背後散亂量 差異(^{241}Am -80 μCi 使用時)

1sec로 測定한 報告도 있다.

5. 螢光 X線을 使用한 皮복두께 측정;

放射性同位元素를 線源으로 한 螢光 X線分析法은 半 導體檢出器(Ge, Si-detector)와 高分解能 波高分析器 (High Resolution Pulse Height Analyzer) 및 各種 filter (FeK, ZnK, CrK, CdK, NiK 및 TiK 등등)를 利用하는 非分散分析法의 發達로 이 分析法이 活潑해 졌고 最近에는 大氣 및 水質 汚染分析에 中性子 放射化分析法과 같이 其利用途가 높아졌다. 다만 두께 측정에는 實用的으로 3.5KeV 以下의 energy를 가진 X線檢出은 簡單치 않고 On-Line 機器로서 對象元素에 限界는 Ca까지이다.

5-1. 皮복층 勵起法

勵起用 放射線을 測定物에 入射시켜 皮복층에 依하여 여기되는 螢光X線強도를 測定하는 方式이고 檢出量 I는

$$I = I_{sat}[1 - \exp(-(\mu_e + \mu_f)x)] \dots\dots\dots (31)$$

가 되고 여기서 μ_e, μ_f 는 勵起用 放射線 및 皮복층에서 여기된 형광X線의 皮복층에 依한 吸收係數고 I_{sat} 는 皮복층에 依한 飽和出力이며

$$I_{sat} = KI_0 \frac{W_K \cdot \zeta_K}{(\mu_e + \mu_f)} \dots\dots\dots (32)$$

로 表示되고 W_K 는 入射放射線의 皮복층 特質의 K-Shell에 依한 光電吸收係數, ζ_K 는 螢光 Yield(收率), I_0 는 勵起入射放射線量이고 I_{sat} 를 주는 두께 x_{sat} 의 값은 大略

$$x_{sat} = \frac{3}{(\mu_e + \mu_f)} \dots\dots\dots (33)$$

과 같이 된다.

基盤(母體)여기法: 여기용방사선이 皮복층을 통과하여 기반에 도달하고 여기서 여기되는 형광X線은 다시 皮복층을 투과하여 外部로 放出되는 量을 測定하는 것이 檢出量 I는

$$I = I_{sat} \exp(-(\mu_e + \mu_f)x) \dots\dots\dots (34)$$

의 形式이 된다. I_{sat} 는 기반에서 여기되는 형광X線의 포화치다.

5-2. 여기용방사선원(형광X線 RI-Source)

^3H -Zr, ^{241}Am , ^{147}Pm -Al 등 여기용방사선 RI-Source로서 갖추어야 할 特性이 있으며 다음과 같은 特性이 要望된다.

(1) 特性X線의 發生效率이 높고 散亂線으로 因한 Background가 낮을 것.

表 5. 螢光 X 線 피복 두께 측정計 利用例

용도	선원	강도	filter	측정범위	정밀도
Sn-전기도금	³ H-Zr(Brems)	2.5Ci	무	0.05~1.5lb/basis box 0~1μm	1%,
Zn-도금	"	"	Ni	5~500×10 ⁻⁶ in	2%,
Cr-도금(鐵 base)	¹⁴⁷ Pm(β)	100mCi	Cr	—	—
Cu(鐵 base)전기도금	³ H-Zr(Brems)	2.5Ci	Fe	~0.1×10 ⁻³ in	2%,
Cd(Fe-base)	¹⁴⁷ Pm-Al(Brems)	100mCi	무	1~3×10 ⁻⁴ in	—
Pt(Ti-base)	³ H-Zr(Brems)	2.5Ci	"	0.2~5×10 ⁻⁵ in	2%,
Au(Ti-base)					
Au(Cu-base)	⁸⁵ Kr(β)	100μCi	—	0.1~1×10 ⁻⁴ in	—

(2) 小形으로서 放出 Yield 가 充分할 것.

(3) 必要한 X 線以外的 γ 線이나 制動放射線이 적을 것 등이다.

여기용방사선원의 energy 는 被測物體의 螢光 X 線 energy 보다 높아야 그 여기의 效率이 높고 X 線인 경우의 效率은 (入射 방사선과 피복물층물질의 K-Sheil 에 의한 光電吸收係數) × (螢光 Yield) 의 값으로 表現 된다. 여기서 使用 되는 線源은 보통 ²¹¹Am, ⁵⁵Fe, ¹⁴⁷Pm-Al, ³H-Zr, ³H-Ti 등의 制動放射線源이다.

上記表5와 같은 RI-Source 에 의한 螢光 X 線勵起法 은 RI 에서 放出되는 放射線強度가 X 線管에서 放出되는 放射線強度와 比較하여 10⁻³~10⁻⁶ 정도로 적다.

한편 검출기의 Window 에는 얇은 foil 로 차폐하는 X 線 filter 방식이 간단하고 安定性이 있으며 또한 높은 分解能을 얻을 수 있으므로 現在 넓게 使用된다.

X 線 filter 를 使用하면 전리함(I.C.)과 같은 energy 分解能이 없는 검출기도 螢光 X-線分析에도 有效하게 使用할 수 있게 된다. X 線 filter 에는 吸收係數 filter, 吸收端 filter, 平衡 filter 등이 利用되고 있다.

表5의 用途에서 例示한 것에서 Zn-도금일 경우 피복의 두께變化에 대한 檢출량 變化의 相對値는 螢光 X 線인 경우가 β 線 backscattering 法에 比하여 10倍정도 높고 螢光 X 線法은 base-metal 의 硬度의 영향이나 空氣密度의 영향도 없다. 檢출기로서는 其安定性 實用性인 面으로 보아 比例計數管이 主로 使用되고 있으나 이는 其分解能으로 높은 線量測定이 困難하고 統計的 用途에 의한 오차가 커서 結果의 應答性이 낮아지는 缺點을 가지고 있다.

6. 結 言

本 解説은 Thickness gauge 만의 特性을 記述하였으나 gauge(defector)로서는 其 Level gauge, Density

gauge, moisture gauge, 硫黃分析計, 雪量計(積雪量測定計), 眞空計, 煙探知器(Smoke detector) 등 RI 利用의 gauge(defector)가 많으며 實際製造工程에서 On-Line 으로 自動制御로서 品質을 管理함에 必要하나 萬一 繼續的이 아니고 Spot-Check 式일 때 RI 利用 gauge 以外에도 Ultrasonic Digital thickness gauge(超音波測厚計)가 있으며 使用目的 用途에 따라서 使用者가 選擇해야 하며 超音波측후계의 長短點, RI-측후계의 長短點을 充分히 理解하고 使用하면 된다.

다만 RI-측후계를 使用할 때 가장 注意해야할 點은 放射線強度가 높을 때 其容器的 차폐, 주위 환경의 오염을 반드시 考慮해야 하며 RI-取扱에 대한 法的規制와 아울러 방사선 防禦(Radiation Protection) 문제를 徹低히 究明하여 作業의 從事者에 대한 人體障害有無를 檢討함은 勿論 ICRP 規定을 充分히 준수하도록 해야 한다.

即 基本的으로 集積線量은 D=5(N-18)rem 을 適用해야 하고 방사선 作業종사자일 때 5rem/y, 관리구역수시出入者는 1.5rem/y, 一般人 即 관리구역以外的 作業자는 방사선종사자의 1/10인 0.5rem/y 로 規制되어 있으며 이 線量은 全身, 生殖腺 및 造血器管에 適用되며 主로 外部被曝에 대한 경우만 고려하면 된다. (RI-gauge 에서) 또한 週常被曝線量은 방사선종사자일 때 30mrem/Week 로 되어 있다. 勿論 取扱者는 上計式에서 18歲 以上이라야 하며 原子力法에 이도 規定하고 있다. 30mrem/Week 의 最大許容線量은 1日 作業時間을 8시간 1週를 6日(作業日)이라고 하면 其許容線量은 0.625mrem/hour 가 되고 차폐容器 周邊의 방사선강도가 1meter 떨어진 곳에서 0.5~1mrem/hour 라고 하면 其位置에서 1時間 있을 때 人體에 대한 被曝線量은 0.5~1mrem 이 되고 2meter 거리에서는 이 값의 1/4 이 된다.

RI-gauge의 Source 近方에는 「管理區域」 標識을 반드시 붙여서 出入禁止의 표시와 줄을 쳐 두어야 한다. β , γ 線 取扱에 있어서 β 線은 物質과의 相互作用이 크므로 γ 線被曝線量에 比하여 β 線피폭선량은 10~100배 정도 높아 피폭관리 觀點에서는 β 線이 더욱 문제가 된다. 하나의 例로 β 線에 依한 吸收線量率은 다음과 같다.

即 방사능의 강도가 $1\mu\text{Ci}$ 인 點선원일 때 1cm거리에서 約 1rad/h 의 흡수선량율이 되며 이때의 $\beta_{\text{max}}=0.3\sim 2.5\text{MeV}$ 범위가 된다. 表面에서는 방사능면밀도가 $1\mu\text{Ci}/\text{m}^2$ 의 面線源일 때 吸收線量率은 선원表面에서 約 10rad/h ($\beta_{\text{max}}=0.8\sim 3.0\text{MeV}$)가 된다. 上記의 방사선량 단위, 방사능의 단위는 最近 SI Unit(System

International)로 使用하도록 勸告하고 있으며 國際放射線 防禦學會(International Radiation Protection Association: IRPA)에서도 이 단위를 積極 추천하고 있으며 當分間은 舊單位系와 SI系를 併用하게 되어 있으며 各種放射線計測器는 勿論 RI-gauge 使用의 防禦用 檢출기기들도 將次 이 SI-Unit의 表示로 使用하게 될 것이다.

끝으로 Thickness gauge를 상세히 설명한 것은 각종 gauge 中 이 gauge의 使用이 各國에서 가장 많고 現在 우리나라에서 使用하고 있거나 또는 앞으로 現場에서 必히 사용하려고 할 때 本補說이 多少나마 도움이 되었으면 多幸으로 여기겠으며 讀者의 전달을 바라 마지 않는다.