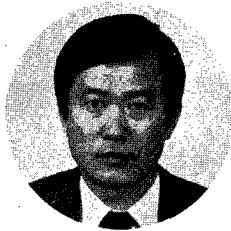


放射線透過試驗의 理論과 適用

The Principle and Application of Radiographic Testing



朴 璵 洵

〈裕洋原子工業(株) 理事〉

1. 概 要

放射線의 工業的 應用分野가 多樣하지만 그중 非破壞檢査에 利用되는 比重도 적지 않다.

放射線透過試驗은 여러가지 放射線 中에 物質을 透過할 수 있는 짧은 波長의 電離電磁波放射線 즉 X-線이나 γ 線을 利用하여 試驗片 内部 欠陷을 2次元의 透影像으로 檢出하여 X-線 필름에 記錄하는 試驗法으로서 客觀性和 記錄性이 優秀하여 널리 이용되고 있다.

X-線이나 γ -線의 發生源은 서로 다르지만 性質은 같다. 이들은 光速으로 直進하며 에너지 水準에 따라 波長이 달라진다. 直進하기 때문에 放射線에 의한 그림자가 생기며 波長의 變化에 따라 透過力이 달라진다. 그리고 物質을 透過하며 物質과 相互作用으로 放射線이 物質에 吸收된다. 입사방사선의 強度를 I_0 , 두께 x 를 투과한 방사선의 強度를 I_x , 투과두께를 x , 吸收係數를 μ 라하면 다음과 같은 吸收關係式이 成立한다.

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

μ 는 放射線과 物質과의 相互作用, 즉 光電效果, Compton 散亂, 雙電子生成에 의해 결정되며 일반적으로 放射線의 波長(λ)이 길고, 物質의 原子番號가 높을수록 μ 값은 커진다. 다시 말하

면 $\mu = K\lambda^3 Z^3$ 의 關係를 가진다." 여기서 K 는 비례상수이고 Z 는 物質의 原子번호이다.

放射線이 이와같은 性質을 가지고 있기 때문에 試驗品內의 欠陷을 寫眞影像으로 얻을 수 있다. 即 放射線透過試驗이 可能하다.

放射線透過試驗에 使用되는 放射線源은 試驗을 할 對象物의 透過두께, 材質, 試驗部의 形狀 등에 의해 選擇되지만 보통 低에너지(300 KeV이하)의 휴대식 X-선장치, 라이낙, 베타트론과 같은 高에너지의 X-선장치, 그리고 Ir192나 Co 60 등의 放射性同位元素에서 放出되는 γ 선을 이용하는 γ 線照射裝置 등이 있다.

그리고 放射線透過像을 얻는데 X-선 필름이 使用된다. X-선 필름은 感光速度, 콘트라스트 및 粒狀性에 따라 여러가지 종류가 있으므로 增感紙와 함께 檢査精密도에 맞게 選擇하여 使用하지 않으면 안된다.

放射線透過試驗에는 X-선 필름을 사용하지 않고 乾式으로 像을 記錄하는 Xeroradiography도 있고, 螢光板에 나타난 像을 형광증배관과 工業用 TV를 利用하여 보는 方法도 있다.

透過試驗에서 缺陷이 檢出되는 程度는 放射線의 에너지, 선원의 크기, 시험품 및 X-선 필름의 촬영배치, 散亂線의 防止, 放射線의 面狀缺

陷에 대한 入射方向, X-線필름의 種類, 透過寫眞의 濃度 등에 따라 크게 左右된다. 그리고 透過寫眞의 觀察條件도 크게 影響을 미친다.

이들 因子중에서 放射線의 入射方向을 제외한 다른 인자는 모의결합이라고 볼 수 있는 線形이나 有孔板形의 像質計(透過度計)를 시험부의 표면에 놓고 동시에 촬영하여 규정된 識別도를 가지는지 여부에 따라 寫眞의 良否를 판단한다. 透過寫眞濃度, 透過度計識別度, 階調計의 濃度差는 透過寫眞의 像質을 나타내는 값으로써 방사선투과시험의 技術의 水準을 보장해 준다. 비과과시험은 一定 기술수준이상으로 이루어진 試驗結果에 대해서만 等級分類를 하고 合否判定을 한다.

일반적으로 投影된 二次元像으로 缺陷을 檢出하는 放射線透過試驗은 缺陷의 깊이에 背向을 알 수 없으므로 缺陷과 強度를 關係해서 評價하려면 缺陷의 試驗部 두께方向이 높이를 알 필요가 있다. 그러므로 面狀缺陷에 대해서는 特殊攝影으로 그것을 推定하지 않으면 안된다. 이경우 超音波探傷法 등 다른 試驗法으로 確認하는 것이 쉽고 더 정확할 경우가 많다.

2. 放射線透過寫眞에 의한 缺陷의 識別

방사선투과사진은 放射線이 試驗體를 透過하면서 試驗體의 内部狀態대로 放射線그림자를 만든 것을 필름에 담아 現像한 것이다. 檢査者는 필름에 나타난 그림자를 눈으로 보고, 그림자의 有無, 그림자의 形態, 그림자의 크기를 가려내어 試驗體의 内部狀態를 推定한다. 이것은 사람의 눈으로 그림자를 識別하는 것이기 때문에 識別的 限界性을 가지게 된다. 즉 그림자의 어둡기와 그림자 주위의 어둡기의 차이가 눈으로 識別할 수 없을 정도로 작으면 그 그림자는 보이지 않는다. 눈의 능력에 한계가 있기 때문이다. 따라서 放射線透過寫眞은 그림자가 만들어지는 모

든 物理的 現象을 내포하며, 撮影할 때는 이러한 현상을 잘 이용하여 缺陷이 눈으로 識別될 수 있도록 撮影條件을 設定하지 않으면 안된다.

透過寫眞의 어둡기의 정도, 즉 검게 변한 정도를 黑化度 또는 필름濃度(Film density)라고 한다. 이것을 D라 하면

$$D = \log \frac{I_0}{I} \dots\dots\dots ②$$

이다.

여기서 I_0 는 필름에 입사한 광의 강도이며, I 는 필름을 투과한 광의 강도이다.

2.1 缺陷의 識別

透過寫眞上에서 缺陷의 有無를 認識할 수 있는 것은 欠陷像의 濃도와 그 주위의 濃도의 差 ΔD 와 사람의 눈으로 識別이 可能한 濃度差, ΔD_{min} 와의 大小關係에 의해 정해진다. 즉 $\Delta D \geq \Delta D_{min}$ 일 때 欠陷像은 識別되지만 $\Delta D < \Delta D_{min}$ 일 때는 缺陷을 識別할 수 없다.

ΔD 를 투과사진의 콘트라스트(contrast)라 하는데 이것은 被試驗體의 材質, 두께의 차, 透過하는 放射線의 線質, 照射의 幾何學的 條件에 바탕을 둔 산란선량의 대소, 선원의 크기와 強度分布, 增感紙를 포함한 X선 필름의 線質 및 線量特性에 關係된다.

또 識別限界濃度差 ΔD_{min} 은 像의 크기와 농도분포, X선필름의 粒狀性, 투과사진의 농도, 투과사진의 觀察條件 즉 室内的 밝기, 필름관찰기의 밝기, 관찰거리 등 觀察者의 個人差 등이 影響을 미친다.

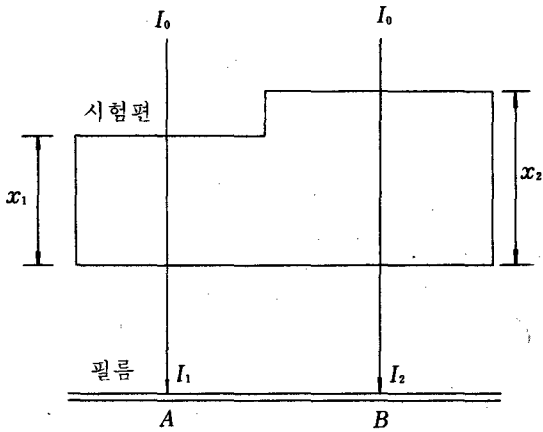
따라서 결함의 식별을 定量的으로 취급하기 위해 ΔD 와 ΔD_{min} 을 정량적으로 검토하여야 한다.

2.2 透過寫眞의 콘트라스트

1) 두께차와 투과사진의 콘트라스트

그림 1에서 X선 필름의 A점 및 B점에 도달

〈그림 1〉 두께차가 있는 시험편의 촬영



한 투과X선의 강도를 각각 I_1 및 I_2 라 하면 A점 및 B점의 노출량을 계산하면 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$E_1 = (K_1/K_0) I_1 t \dots\dots\dots(3-1)$$

$$E_2 = (K_2/K_0) I_2 t \dots\dots\dots(3-2)$$

여기서

K_0 : X선필름의 特性曲線을 작성한 X선의 線質에 대한 感度係數

K_1, K_2 : X_1, X_2 를 투과한 X선의 線質에 대한 感度係數

t : 노출시간

그림 2는 횡축에 露出量 E 의 로그를 취하고, 종축에 투과사진의 濃度 D 를 취해서 얻어진 필름 特性曲線이다. 여기서 露出量 E_1 및 E_2 에 의해 透過寫眞의 濃度가 각각 D_1 및 D_2 로 얻어진다.

D_1 와 D_2 사이의 X선필름의 평균필름콘트라스트를 \bar{r} 라 하면 다음 식의 관계가 있다.

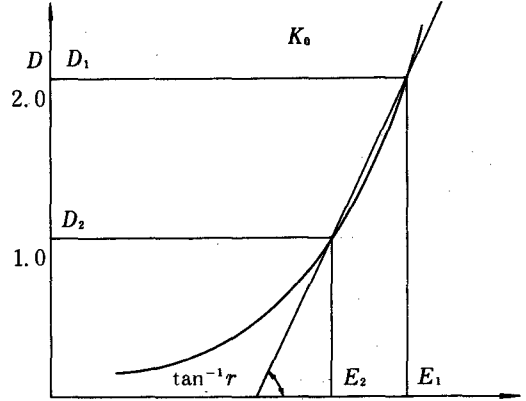
$$D_1 - D_2 = \bar{r} (\log E_1 - \log E_2) \dots\dots\dots(4)$$

④식에 3-1식과 3-2식을 대입하면 다음 식이 얻어진다.

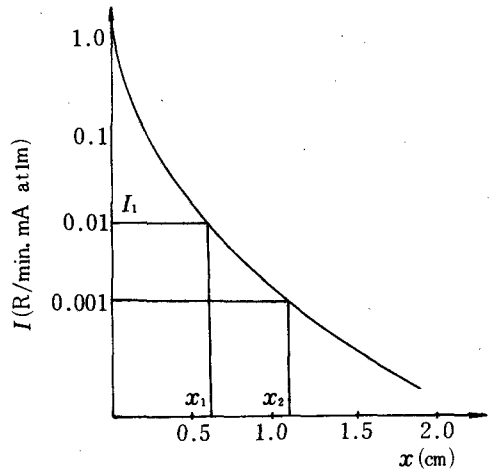
$$D_1 - D_2 = \bar{r} \{ \log (K_1 I_1) - \log (K_2 I_2) \} \dots\dots\dots(5)$$

다음으로 그림 3과 같은 吸收曲線이 여러가지 두께 x 에 대응하는 透過線量率 I 와 그 線質에 대응하는 감도계수 K 와의 곱을 구하여 그림4와 같은 x 와 KI 와의 관계, 즉 X線필름의 감도계

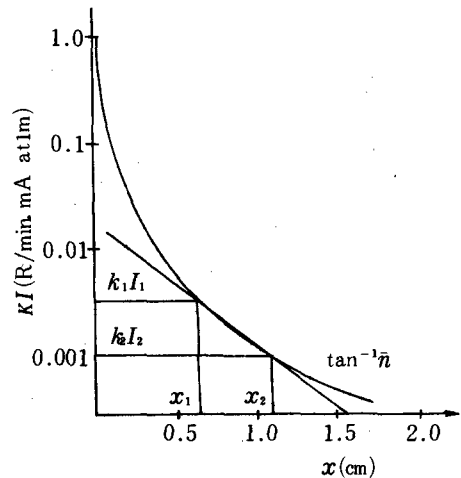
〈그림 2〉 X線 필름의 特性曲線



〈그림 3〉 X선의 흡수곡선



〈그림 4〉 X線 필름의 감도계수를 고려한 吸收曲線



수를 고려한 吸收曲線을 구한다. 여기서 x_1 및 x_2 에 대응한 曲線上的의 点을 이은 直線이 傾斜과 이룬 기울기를 $\bar{\eta}$ 라 하면 다음 식의 관계가 있다.

$$\log(K_1 I_1) - \log(K_2 I_2) = \bar{\eta}(x_1 - x_2) \dots\dots\dots ⑥$$

⑤, ⑥ 두 식에서 다음 식이 얻어진다.

$$D_1 - D_2 = \bar{r}\bar{\eta}(x_1 - x_2) \dots\dots\dots ⑦$$

따라서 미소한 두께의 차 Δx 에 대응한 투과사진의 콘트라스트 ΔD 는 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta D = \gamma \eta \Delta x \dots\dots\dots ⑧$$

다시 식⑧에서 η 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = d \log(KI) / dx = -0.434 \mu_p \dots\dots\dots ⑨$$

여기서 μ_p 는 X선필름의 感度係數를 고려한 X선의 線質이다.

그러므로 식⑧은 다음 식이 된다.

$$\Delta D = -0.434 r \mu_p \Delta x \dots\dots\dots ⑩$$

2) 散亂線과 透過寫眞의 콘트라스트

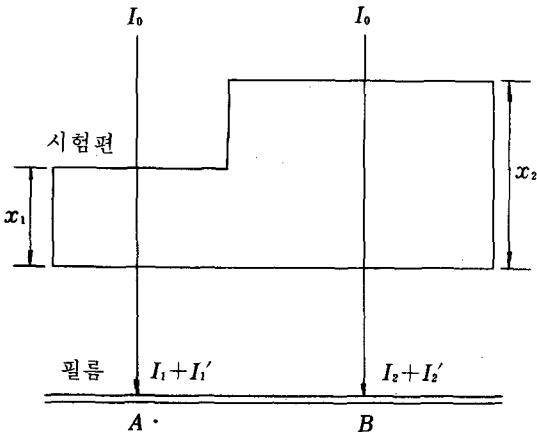
그림 5와 같이 透過線에 散亂線이 더해질 경우 A점과 B점 사이의 透過寫眞의 콘트라스트는 다음 식으로 구해진다.

$$D_1 - D_2 = r \{ \log(K_1 I_1 + K'_1 I'_1) - \log(K_2 I_2 + K'_2 I'_2) \} \dots\dots\dots ⑪$$

여기서

K'_1, K'_2 : A점, B점에 도달한 산란선의 선질에 대한 X선필름의 감도계수

〈그림 5〉 산란선의 영향이 있는 촬영



I'_1, I'_2 : A점, B점에 도달한 산란선의 선량을
그러나 X선 필름에 도달한 산란선이 균일하고, 이 때 감도계수를 고려한 량이 A점의 透過線의 n배가 된다고 하면 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$D_1 - D_2 = r \{ \log\{K_1 I_1 + n(K_1 I_1)\} - \log\{K_2 I_2 + n(K_2 I_2)\} \} \dots\dots\dots ⑫$$

두께의 차가 작을 경우에 $K_1 I_1 = q, K_2 I_2 = \Delta q$ 라 하면, 이때 투과사진의 콘트라스트 ΔD 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta D &= r \{ \log\{(1+n)q\} - \log\{(1+n)q - \Delta q\} \} \\ &= -r \log\{1 - (\Delta q/q)/(1+n)\} \\ &= -0.434 r \ln\{1 - (\Delta q/q)/(1+n)\} \\ &= 0.434 r \{ (\Delta q/q)/(1+n) + \frac{1}{2} (\Delta q/q)^2 / (1+n)^2 + \dots\dots\dots \} \end{aligned}$$

$$\approx (0.434 r \Delta q/q) / (1+n) \dots\dots\dots ⑬$$

이 식을 보면 두께차가 아주 작을 때 투과사진의 콘트라스트는, 투과선의 n배가 되는 散亂線이 영향을 미친다면 산란선이 거의 없을 때 투과사진 콘트라스트의 $1/(1+n)$ 로 줄어 든다는 것을 알 수 있다.

透過寫眞의 콘트라스트는 이 외에 線源의 크기에 영향을 받는다 缺陷의 크기가 線源의 크기에 비해 아주 클 때에는 그 영향을 무시해도 좋지만 缺陷의 크기가 선원크기보다 작아지면 선원 크기에 따른 촬영의 幾何學的의 條件의 영향이 나타나므로 그것이 補正이 必要하다. 이 補正係數를 σ 라 하면 투과사진 콘트라스트는 종합적으로

$$\Delta D = -0.434 r \mu_p \sigma \Delta x / (1+n) \dots\dots\dots ⑭$$

의 관계를 가진다.

2.3 識別限界콘트라스트

1) 線像의 識別限界 콘트라스트

線像의 식별한계콘트라스트 ΔD_{min} 는 濃도가上昇하면 增加하고, 上昇의 程度는 線像의 폭이 작을 수록 현저하다.①

또 ΔD_{min} 은 感光材料에 따라 다르다. 粒狀性이 좋은 X선필름과 増感紙를 찍지은 것이, 같은 폭의 線像에 대해 粒狀性이 나쁜 쪽보다 ΔD_{min} 이 작다는 것은 익히 잘 알려진 사실이다.

2) 透過寫眞의 觀察方法에 따른 影響

투과사진의 농도는 식 ②로부터 정의했다. 이 식에서 볼때 일정한 밝기의 필름觀察器를 쓸 경우 透過寫眞의 濃度가 높아질수록 L이 작아짐을 알 수 있다. 농도가 상승한다는 것은 L이 감소하게 되고 ΔD_{min} 이 커진다는 것을 의미하므로 ΔD_{min} 을 크지 않게 하기 위해서는 濃度가 상승하더라도 L이 작아지지 않도록 L_0 를 크게하지 않으면 안된다.

또 觀察하는 室内가 밝을 경우 눈으로 들어오는 빛은 투과사진을 투과한 빛의 강도 L보다 L_{s1} 이 더해진다. 식②의 관계에서 $D_1 > D_2$ 일 때 농도차 ΔD 를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta D &= D_1 - D_2 = \log(L_0/L_1) - \log(L_0/L_2) = \\ &= \log(L_2/L_1) \dots\dots\dots ⑮ \end{aligned}$$

$L_1 = L, L_2 = L - \Delta L$ 이라 하면, 식⑮는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta D &= \log\{(L - \Delta L)/L\} = \log\{1 - (\Delta L/L)\} \\ &= 0.434 \ln\{1 - (\Delta L/L)\} \\ &= -0.434 (\Delta L/L) \dots\dots\dots ⑯ \end{aligned}$$

L_1 과 L_2 에 각각 L_{s1} 이 더해질 경우 $L_{s1}/L = n'$ 라 하면 겉보기 농도차 $\Delta D'$ 는 식 ⑬과 같은 방법으로

$$\Delta D' = \Delta D / (1 + n') \dots\dots\dots ⑰$$

이 된다.

L_{s1} 이 더해질 경우 濃度差가 겉보기상 작아진다는 것을 나타낸다. 즉 L_{s1} 이 가해지면 ΔD_{min} 이 커지게 된다.

3. 放射線透過寫眞의 鮮明度에 미치는 影響

방사선투과사진에 나타난 그림자 가장자리의

흐려진 程度는 그림자의 識別에 영향을 미친다. 이것은 사진촬영에 사용한 선원이 點線源이 아닌 어떤 크기를 가진다는 것과 放射線이 試驗體面에 수직방향으로 나란히 入射하지 않고 線源으로부터 放射狀으로 擴散되면서 入射하는 것에 원인이 있다.

3.1 線源의 크기와 鮮明度

寫眞像이 흐려짐에 영향을 주는 것은 여러가지가 있지만 크게 나누면 幾何學的 條件에 의한 반그림자의 영향, 필름의 입상성, 방사선의 에너지 및 산란선의 영향이 있다.

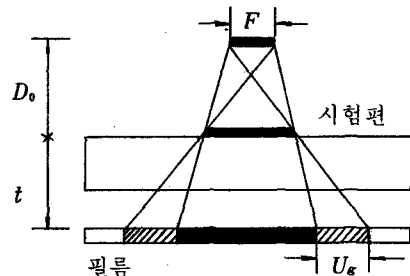
幾何學的 條件에 의한 영향은 線源이 점이 아니라 크기를 갖고 있으므로 투과사진에 반그림자가 생기는 것이다. 반그림자의 크기가 눈에 식별되지 않을 정도로 작게 하지 않으면 안된다. 그래서 방사선 투과시험에 대한 각 공업규격에는 허용반그림자의 크기를 정해 놓고 있다.

그림 6과 같이 선원에서 시험편까지의 거리를 D_0 , 시험편전면에서 필름까지 거리를 t , 선원의 크기를 F 라 하면 반그림자의 크기 U_g 와는 다음 관계가 있다.

$$U_g = \frac{F \cdot t}{D_0} \dots\dots\dots ⑱$$

U_g 가 커지면 본그림자의 선명도가 떨어지므로 U_g 가 작아지는 條件을 설정해야한다. 그러나 실제로 U_g 를 조정할 수 있는 길은 D_0 를 늘리는 길 밖에 없으며, D_0 를 늘리면 露出時間이 제품에 비례하여 증가하므로서 作業性에 문제가

〈그림 6〉 빈그림자의 크기



있어 最適條件을 찾지 않으면 안된다.

3.2 缺陷像의 擴大와 鮮明度

방사선은 線源으로부터 放射狀으로 퍼져나가 기 때문에 필름에 찍히는 投影像은 擴大된다. 그림 6에서 線源이 点이라면 影像은 實像보다 $(D_o + t)/D_o$ 배로 擴大됨을 계산할 수 있다. 이것은 역으로 放射線透過寫眞에 나타난 既知의 實像에 대한 影像의 크기를 측정함으로써 規定된 攝影配置로 촬영했는지 여부를 確認할 수 있는 方法으로 利用된다.

선원이 点이 아니라면 擴大率에 비례하여 鮮明度가 커짐을 알 수 있다. 따라서 擴大攝影을 하려면 線源을 작은 것으로 選擇해야한다. 요즘 電子部品 등 확대촬영을 필요로 하는 경우가 많다. 그리고 線源의 位置와 欠陷位置와의 配列이 어긋나게 되면 欠陷像은 찌그러지게 되고 像의 鮮明性은 그 程度에 따라 변한다.

4. 放射線透過試驗法의 適用

放射線透過試驗은 内部欠陷의 檢出에 適用하는 非破壞檢査法으로써 壓力容器, 船體, 파이프 라인 기타 構造物의 熔接部나 鑄造品 등의 檢査에 널리 適用되고 있다. 두꺼운 試驗體일 경우에 에너지가 높은 X선이나 γ 선을 사용하지만 두께가 얇은 試驗體는 에너지가 낮은 X선을 사용한다. 放射線透過試驗은 透過可能 두께에 限界가 있어 방사선 에너지에 비해 상대적으로 두꺼우면 촬영이 곤란하다. 鐵鋼일 경우 約 450mm, 알루미늄일 경우 約 1,200mm까지 가능하다.⁴⁾

缺陷中에서도 브로우 홀, 스크래그 개입 개재물 및 수축공 등과 같이 放射線의 透過方向에 대한 두께차가 생기는 결함에 대해서는 작은 결함까지 比較的 檢出이 잘 된다. 그러나 반대로 균열과 같이 어느 정도의 면적이 있어도 두께가 극히 얇은 결함은 균열면에 平行에 가까운 方向으

로 放射線을 入射시킬 수 있으면 檢出이 容易하지만 15° 이상으로 기울어진 方向으로 입사하면 두께차가 거의 없으므로 檢出이 困難해진다. 용접부의 용합불량은 이와같은 형태의 결함으로 방사선의 조사방향이 맞지 않으면 檢出되지 않을 경우가 많다.

투과사진을 관찰하면 內在한 결함의 二次元的인 형상, 크기, 분포상태 등을 바로 알 수 있고 缺陷의 種類도 추정하기 쉽다. 한 장의 투과사진으로 결함의 두께방향의 높이나 表面으로부터의 位置를 알 수 없으나 照射方向을 바꾸어 두 장의 투과사진을 찍으면 두께방향의 정보도 얻을 수 있다.

방사선투과시험은 靚트겐이 X선을 발견한 이후 금세기 초부터 工業的으로 利用해 왔으나 放射線이 人體에 障害를 誘發하므로 취급시에 細心한 注意를 기울이지 않으면 안된다. 우리나라에서는 原子力法으로 安全管理의 側面的 規制를 하고 있으나 무엇보다도 利用者 自身이 安全에 힘써야 한다. 世界的으로 放射線透過試驗量이 다른 檢査法에 비해 相對的으로 감소하는 추세이지만 아직 우리나라에서는 放射線透過試驗目的의 放射性同位元素의 輸入量이 계속 증가할 뿐만 아니라 단위강도도 높아지고 있어 安全管理에 더욱 힘써야 된다. 檢査對象物의 重量化에 따른 結果이지만 低強度 線源으로 重對象物의 檢査를 할 수 있는 技術의 開發에도 關心을 돌려 볼 필요도 있다.

(참고문헌)

1. Agfa - Gervart 편, Industrial radiography, p45.
2. 日本能率協會編, 非破壞檢査の手引き, p155-160
3. 日本非破壞檢査協會編, 放射線透過試驗 B. p13-19
4. 日本非破壞檢査協會編, 非破壞檢査概論 A. p29-32
5. ASNT 편, Radiographic Testing, NDT Hand Book, Vol. III