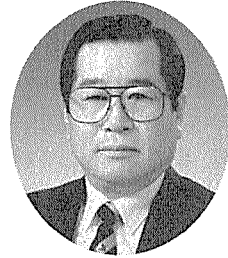


# γ-선투과시험의 FILM상질평가



채 화 목

한양종합검사(주) 회장  
現 한국비파괴검사학회 회장

## 1. 서 언

비파괴검사법 중에서 X-선 및 γ-선에 의한 방사선투과시험법은 원자력법에 의한 이용상의 규제와 방사선작업종사자의 피할 수 없는 얼마간의 체외피폭 등에도 불구하고, 비파괴검사법 중에서 가장 신뢰성이 높은 방법으로 널리 이용되고 있다.

그 이유는, 시험부위의 결함의 위치, 크기, 형상등이 투과사진상에 像으로서 객관적인 정보를 나타내기 때문이다.

투과사진에 의해 시험체의 등급분류 및 합격/불합격의 판정을 함에 있어서, 상기의 객관성을 뒷받침하기 위해서는 일정수준 이상의 像質을 갖출 필요가 있으며, 상질을 확인하기 위하여 일반적으로 투과도계식별도와 농도범위의 제한에 의하여 투과사진의 상질을 평가하고 있다.

그러나, 투과도계식별도는 시험부위와 함께 촬영한 투과도계의 미세한 철선의 식별가능여부에 의하기 때문에, 판정자의 주관에 의한 개인차를 피할 수 없으므로, 이와 같은 개인차를 없이 하고, 객관성이 있는 상질평가법으로서 계조계의 농도차를 이용하는 방법이 병행되고 있다.

한편, 계조계는 정해진 규격에 의하여 여러 형상과 적용방법에 대해 각각 고유의 운용이 되고 있으며, 투과사진의 상질평가법으로서 정착되고 있는 투과도계식별도와와의 직접적인 관계에 대해서는 밀접한 관계가 있다고 여기면서도, 실험에 의한 검토는 행하지 않았었다.

본고에서는, JSNDI의 월간 Journal에 최근 게재된 “γ-선투과시험에 있어서의 투과사진의 상질평가”에서 평판step에 의한 선질인자의 측정실험에 의해서, γ-선투과사진 상질평가법에 대해 새롭게 Approach한 Report를 주요내용으로 발췌하였다.

## 2. 상질평가와 선질인자

γ-선투과검사에 비하여 γ-선투과검사는 선원으로서 Ir-192 또는 Co-60을 사용하기 때문에, 방사선의 Energy가 비교적 높으므로, 투과사진의 상질면에서 적용될 수 있는 시험체의 최소두께에 대한 제한을 받는다.

예를들면, ASME규격에 있어서는 Ir-192 선원 및 Co-60선원의 경우 각각 19mm 및 38mm 이하의 강판에 대해서는 적용이 제한되고 있다.

다만, 투과도계식별에 관한 요구가 충족되면, 각각 19mm 및 38mm 이하의 제한을 받지 않아도 된다.

위의 적용제한을 받는 경우에는 X-선발 성장치를 사용하고 있지만, 전원공급이 용이하지 않은 Field에서의 투과시험 및 강관의 원주용접부위에 대한 panoramic 촬영에 대해서는  $\gamma$ -선을 사용한 투과시험이 행해지고 있다.

$\gamma$ -선투과시험에 있어서의 투과사진의 상질평가법에 대하여, HITACHI 조선소의 Yukihiro TERADA씨 등이 계조계의 代用으로 평판 Step을 사용시의 농도차로부터 구할 수 있는 선질인자가 투과도계를 사용해서 얻어지는 선질인자와 밀접한 관계가 있다는 것을 실험으로 규명하였으며, 그 개요는 다음과 같다.

투과도계를 사용하는 경우 투과도계의 상질과 시험조건과의 관계는 식(1)과 같으며, 식(1)에서 등식이 성립하는 경우가 투과사진의 상질을 나타내는 투과도계식별최소철선지름  $d_{min}$ 와 시험조건을 나타내는 선질인자  $\mu_p/(1+n_1)$ 과의 정량적인 관계를 나타낸다.

$$\frac{\mu_p}{(1+n_1)} \geq \frac{|\Delta D_{min}|}{|-0.434\gamma d|} \dots\dots\dots \text{식(1)}$$

$\mu_p$ : X-선 Film의 감도계수를 고려한 흡수계수

$n_1$ : 산란비

$\Delta D_{min}$ : 투과도계식별한계 농도차

$\gamma$ : Film Contrast

$\sigma$ : 선원 size 및 촬영배치의 기하학적 조건에 의한 보정계수

$d$ : 투과도계의 철선지름

$\mu_p/(1+n_1)$ : 선질인자

한편, 평판step은 그 투영상이 정방형의 형상을 가지며, 용접부의 투과사진의 촬영에 있어서는 평판step과 검사모재부위간의 농도차를 이용해서 상질을 평가한다.

이때, 평판step의 size는 선원size에 비교

해서 충분한 크기이기 때문에 기하학적조건에 의한 보정계수  $\sigma$ 의 값은 1로 간주할 수 있다.

이점을 고려하여, 평판step으로 얻어지는 농도차와 시험조건을 나타내는 모든 인자와의 관계를 식(2)로 나타냈다.

$$\frac{\mu_p}{(1+n_1)} = \frac{kc(D_{2c}-D_1)}{-0.434\bar{\gamma}(T_2-T_1)} \dots\dots\dots \text{식(2)}$$

$D_1$ : 검사모재부위의 중앙의 농도

$D_{2c}$ : 평판step의 중앙의 농도

$T_1$ : 검사모재의 두께

$T_2$ : 검사모재와 평판step의 두께 합계

$\bar{\gamma}$ : Film Contrast 평균치

$kc$ : 충분히 폭이 넓은 평판step으로 얻어지는 상질의 평가치( $kc=1$ 의 경우)로부터 폭이 좁은 경우의 평가치를 구하기 위한 보정계수

$$kc = \log \frac{I_2 + I_{s1}}{I_1 + I_{s1}} / \log \frac{I_2 + I_{s2c}}{I_1 + I_{s1}} \dots\dots\dots \text{식(3)}$$

$I_1$ : 검사모재부위의 투과도율

$I_2$ : 평판step부위의 투과도율

$I_{s1}$ : 검사모재부위의 산란선량율

$I_{s2c}$ : 충분히 넓은 평판step부위의 산란선량율

식(1)과 식(2)의 좌변은 모두 선질인자  $\mu_p/(1+n_1)$ 으로 표시되어 있으므로, 이 선질인자를 매개로 하여, 투과도계의 식별최소 철선지름과 평판step의 농도차와의 관계를 정량적으로 밝히는 것이 가능할 수 있다.

투과도계식별한계농도차  $\Delta D_{min}$ 는 농도계에 의한 측정은 곤란하기 때문에, 그 값은 투과사진을 관찰자가 눈으로 관찰하는 것에 의해서 구해진다.

그러나, 식(2)의 인자( $D_{2c}-D_1$ )은 평판step의 농도차이며, 농도계를 사용하여 정량적으로 측정하는 것이 가능하다.

뿐만아니라, 평판step의 두께를 적절히 선택하면 정밀하게 측정하는 것도 가능하므로, 식(2)의 우변의 값을 평판step에 의한 상질

평가치로 정의하면, 객관적인 Data에 의한 상질평가가 가능할뿐 아니라, 시험조건으로서의 선질인자  $\mu_p/(1+n_1)$ 을 투과사진으로부터 직접 측정할 수 있다.

### 3. 흡수계수 및 산란비

선질인자에 대해서는 각각 흡수계수  $\mu_p$ 와 산란비  $n_1$ 의 정확한 수치를 구할 필요가 있으며, 이를 위하여 Ir-192 및 Co-60을 사용하여 Narrow Beam 및 Broad Beam에 대한 실험에 의하여 구해진 흡수곡선 그림(1)과 그림(2)로부터 흡수계수  $\mu_p$ 를 산출하였다.

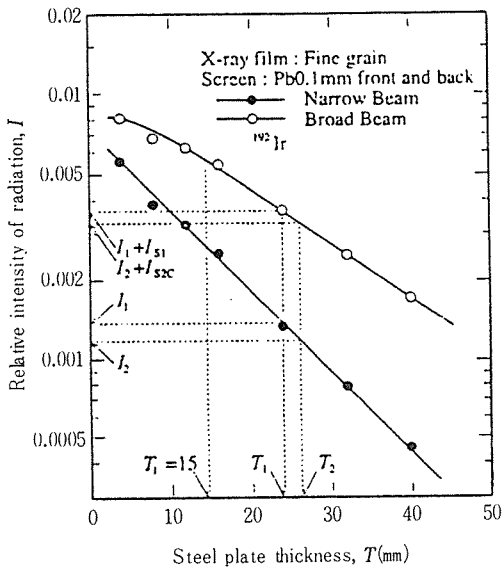


Fig. 1 Absorption curve for  $^{192}\text{Ir}$

즉, Narrow Beam의 흡수곡선 기울기로부터 흡수계수  $\mu_p$ 를 구한 결과 Ir-192 및 Co-60에 대하여 각각  $0.0695\text{mm}^{-1}$  및  $0.045\text{mm}^{-1}$ 가 얻어졌다.

산란비  $n_1$ 은 Narrow Beam과 Broad Beam에 의한 촬영에서 양자의 농도가 동일하게 되는 노출시간에 따른 식(4)로 나타낼 수 있다.

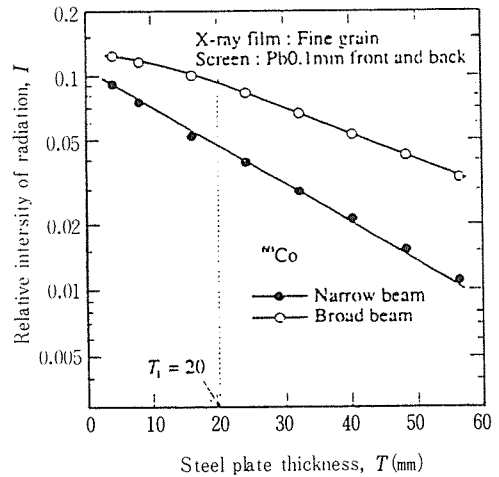


Fig. 2 Absorption curve of  $^{60}\text{Co}$

$$n_1 = \frac{E_N}{E_B} - 1 \dots\dots\dots \text{식(4)}$$

$E_N$  : Narrow Beam에 의한 노출시간  
 $E_B$  : Broad Beam에 의한 노출시간

여러 시험체의 두께에 대하여 얻어진  $E_N$  및  $E_B$ 의 수치로부터 식(4)에 의하여 여러 강판두께  $T_1$ 에 대한 산란비  $n_1$ 을 계산한 것은 그림(3) 및 그림(4)의 검은점으로 되었다.

Ir-192 및 Co-60이 적용되는 강판두께는 일반적으로 10mm 이상이므로 검은점의 수치로  $n_1$ 과  $T_1$ 과의 관계를 식으로 만들면, Ir-192 및 Co-60에 대해서 각각 식(5) 및 식(6)이 얻어진다.

$$\text{Ir-192의 } n_1 = 0.0619T_1 + 0.217 \dots\dots\dots \text{식(5)}$$

$$\text{Co-60의 } n_1 = 0.0304T_1 + 0.308 \dots\dots\dots \text{식(6)}$$

### 4. 선질인자에 의한 상질평가

선질인자는 시험체의 재질, 두께 및 선택된 방사선의 Energy에 의해서 결정되며, 상질을 표시하는 parameter로 이용될 수 있다.

Narrow Beam의 흡수곡선으로부터 얻어

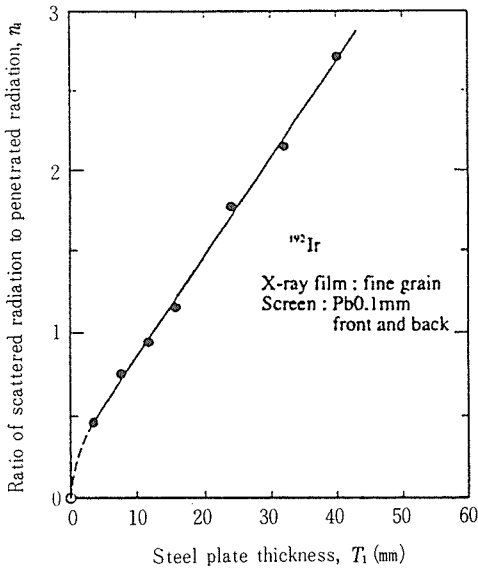


Fig. 3 Relation between the ratio of scattered radiation to penetrated radiation and steel plate thickness for  $^{192}\text{Ir}$

지는 흡수계수  $\mu_p$ 와 식(5) 및 식(6)으로부터 구해지는 산란비  $n_s$ 의 값으로 선질인자와 강판의 두께  $T_1$ 과의 관계를 나타내면 그림5와 같다.

그림5에서 Ir-192 및 Co-60의 어느 경우에도 선질인자는 강판의 두께가 증가함에 따라 감소하는 경향을 알수 있으며, 강판이 얇은 경우는 Ir-192와 Co-60이 차이가 크지만, 두께가 증가함에 따라 접근하는 경향을 볼수 있다.

이러한 접근은 다음의 현상에 기인한다. 강판의 두께가 얇은 경우는 Ir-192와 Co-60의 산란비는 거의 유사한 값을 가지므로 흡수계수의 차이에 의존하게 되는 경향이 있게 된다.

그러나, 강판의 두께가 두꺼워지면, 산란비가 증가할 뿐아니라, Ir-192가 Co-60에 비하여 크게 변화하므로, 두께가 두꺼워지면 선질인자의 값은 차차 감소되어 Co-60의 선질인자와 가까워지게 된다.

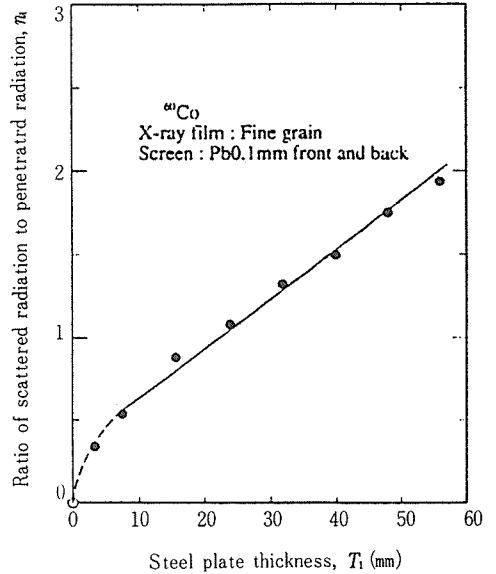


Fig. 4 Relation between the ratio of scattered radiation to penetrated radiation and steel plate thickness for  $^{60}\text{Co}$

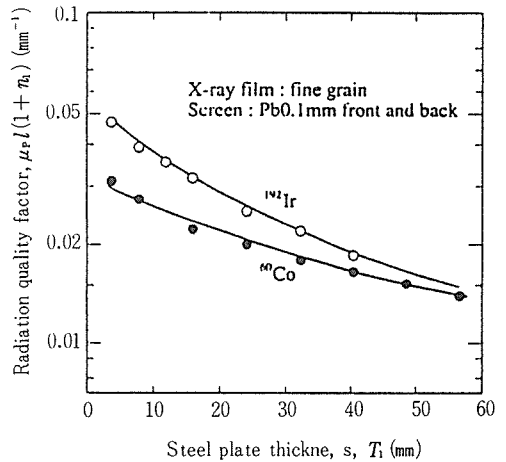


Fig. 5 Relation between the radiation quality factor and steel plate thickness

## 5. 투과도계에 의한 상질평가

선질인자와 투과도계의 식별최소철선지름과의 정량적인 관계를 검토하기 위해 이제까지는 밝혀지지 않은 투과도계식별한계농도차  $|\Delta D_{\min}|$ 을 Ir-192선원으로 실험하여 구하였다.

실험에 사용된 촬영조건은 Narrow Beam으로 하고, 흡수체의 두께는 4mm로 하였다.

투과도계의 식별한계 농도차를 구하기 위한 투과사진의 촬영에는 이중노출법을 사용하였다.

즉, 목표로 하는 농도를 구하기 위하여 노출시간  $t_a$ 와  $t_b$ 로 분할하여, 먼저  $t_a$ 시간 노출하고, 그후 투과도계를 제거하여  $t_b$ 시간 추가노출을 하여 목표로 하는 농도를 얻는 방법이다.

얻어진 투과사진은 그림6과 같다.

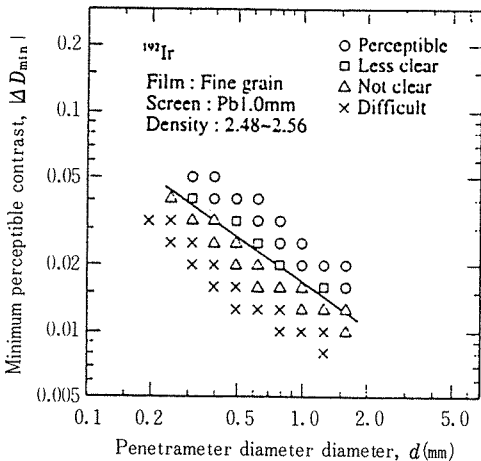


Fig. 6 Relation between the minimum perceptible contrast and the penetrometer diameter

□ 표로 나타난 Data를 연결하면, 투과도계의 식별한계농도차  $|\Delta D_{\min}|$ 은 투과도계의 철선지름이 증대하는 것과 함께 직선적으로 감소하는 것을 알 수 있다.

다음에, 투과도계식별최소 철선지름을 구하기 위하여 Broad Beam에 의해 투과도계를 촬영하였다.

강판의 여러 두께에 대한 노출시간은 투과사진의 농도가 거의 2.5가 되도록 설정하였으며, 촬영에 사용한 투과도계의 여러 철선지름에 대한 값을 산출하여 표(1)로 구해졌다.

Table. 1

Relation between the penetrometer diameter and  $|\Delta D_{\min}| / 0.434 \gamma \sigma d$

Thickness of diameter $d$ (mm)	0.20	0.25	0.32	0.40	0.50	0.64	0.80
$\frac{ \Delta D_{\min} }{0.434 \gamma \sigma d}$	0.114	0.0783	0.0514	0.0352	0.0241	0.0158	0.0108

한편, 얻어진 투과사진의 관찰결과는 그림7과 같다.

실선은 그림5에서 나타난 Ir-192의 경우의 선질인자의 값이다.

투과도계의 선경이 이산적이며, 관찰자의 판단에 의하는 애매한 점을 감안하면, 투과

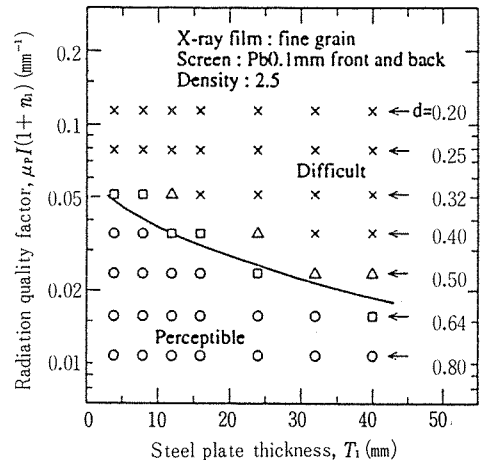


Fig. 7 Relation between the radiation quality factor and steel plate thickness

도계의 식별최소철선지름과 선질인자와는 대응관계가 나타남을 보여준다.

그림(7)중에는 선질인자에 대응하는 투과도계의 철선지름  $d$ 와 강판의 여러 두께에 대한 투과사진의 관찰에 있어서 약간 불명료한 것도 식별가능으로 판단할 경우, 투과도계의 식별최소철선지름  $d_{min}$ 은 그림(8)과 같다.

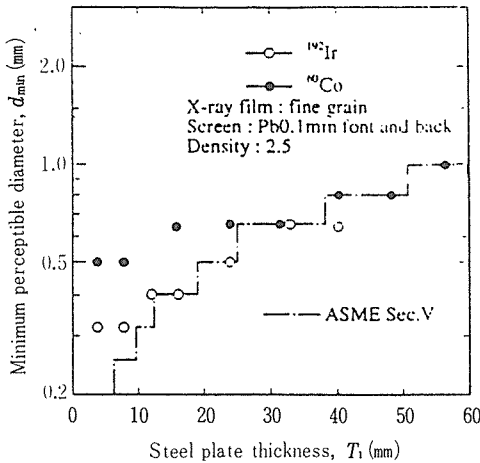


Fig. 8 Relation between the minimum perceptible diameter of penetrometer and steel plate thickness

현재의 ASME규격에서는, 투과도계로서 종래부터 사용하고 있는 유공형과 더불어 철심형을 사용하는 것이 가능하다.

그림(8)에는 이것에 규정되어 있는, 식별되어야 할 지름을 - · - ·로 표기했다.

그림(8)에서 ○, ●, - · - ·를 비교하여 보면, 규격본문에서 허용하고 있는 강판의 두께의 하한치인 Ir-192의 경우 19mm와 Co-60의 경우 38mm보다 약간 얇은 두께까지도 Ir-192 및 Co-60을 적용하는 것이 가능함을 볼수 있다.

## 6. 평판step에 의한 상질평가

투과도계에 의한 상질의 평가실험과 함께, 투영상이 정방형이 되는 평판step을 동시에

촬영하여, 검사모재부위와의 농도차의 값을 써서 평판step에 의한 상질평가치  $E_u$ 를 구하였다.( $E_u$ 는 식(2)의 유변과 같다.)

$$E_u = \frac{kc(D_{2c} - D_1)}{-0.4347(T_2 - T_1)} \dots\dots\dots \text{식(8)}$$

실험에 앞서서, 보정계수  $kc$ 를 구했다. 이 보정계수가 성립하는 것은 Broad Beam에 의한 흡수곡선이 직선으로 보이는 범위이며, 그림(1) 및 그림(2)에서 Ir-192의 경우는 강판두께  $T_1$  15mm이상이며 Co-60의 경우는 강판두께  $T_1$ 이 20mm이상으로 된다.

평판두께를 2mm를 해서 그림(1)에서 이 조건을 충족하는  $T_1=24\text{mm}$  ( $T_2=26\text{mm}$ )의 경우에 대응하는 종축의 값을 구하면 식(3)의  $I_1$ 과  $I_2$ 가 각각 구해진다.

Broad Beam에 의한 흡수곡선을 써서  $T_1=24\text{mm}$  및  $T_2=26\text{mm}$ 에 대응하는 종축의 값을 구하면 식(3)의  $I_1 + I_{s1}$ 과  $I_2 + I_{s2}$ 가 각각 얻어진다.

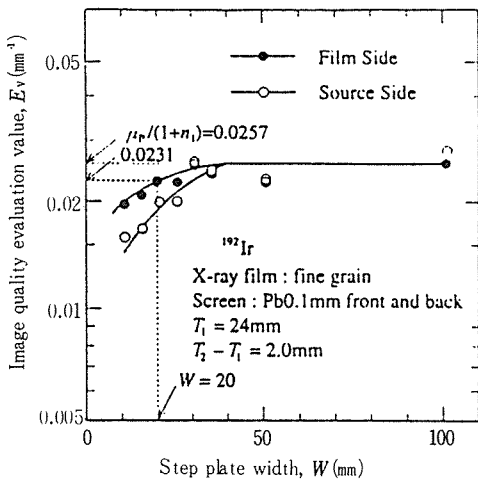
따라서, 식(3)에서의 보정계수  $kc$ 를 구하는 것이 가능해진다. 여러  $T_1$ 에 대한 보정계수  $kc$ 를 구한 결과는 표(2)와 같다.

Table. 2 Values of correction factor  $kc$

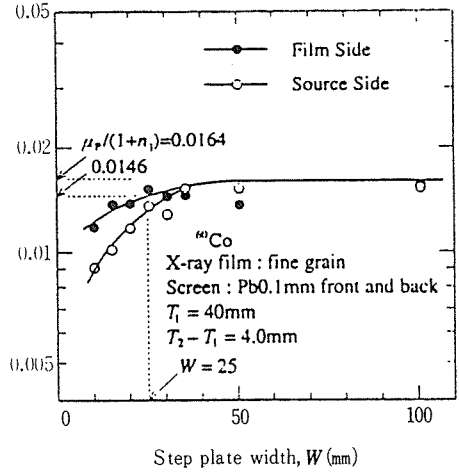
Steel plate thickness $T_1$ (mm)	16.0	24.0	32.0	40.0	48.0	56.0
<sup>192</sup> Ir	0.745	0.541	0.424	0.349	-	-
<sup>60</sup> Co	-	0.757	0.638	0.551	0.485	0.433

Ir-192선원으로, 강판두께  $T_1=24\text{mm}$  및  $T_1=40\text{mm}$ 의 경우에 대해서 평판step에 의한 상질평가치  $E_u$ 와 평판step의 폭  $W$ 와의 관계에 관하여 실험으로 구한 결과는 각각 그림(9) ㉠ 및 ㉡와 같다.

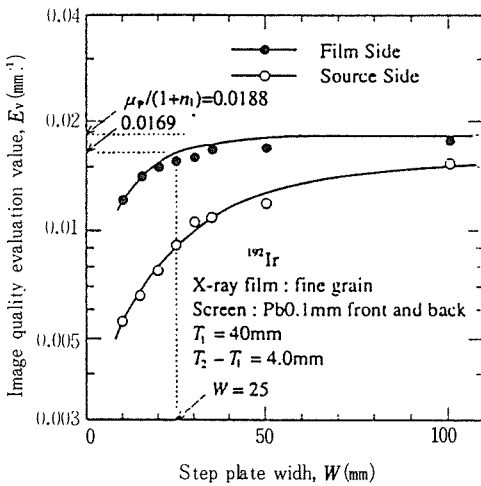
그림(9) ㉠에서 ●표는 ○는 큰 차이가 없다. 또한 평판step의 폭이 넓은 경우에는 평가치  $E_u$ 의 값은 선질인자와 같으나, 폭  $W$ 가 좁은 경우에는 평가치  $E_u$ 의 값은 선질인



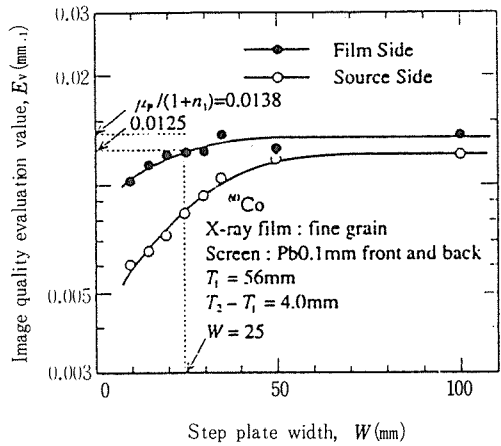
(a) Steel plate thickness : 24mm



(a) Steel plate thickness : 40mm



(b) Steel plate thickness : 40mm



(b) Steel plate thickness : 56mm

Fig. 9 Relation between the image quality evaluation value and step plate width for  $^{192}\text{Ir}$

Fig. 10 Relation between the image quality evaluation value and step plate width for  $^{60}\text{Co}$

자보다도 적게 된다.

이것은 식(8)의 보정계수  $kc$ 가 이 영역에서는 유효하지 않은 것을 나타낸다.

강판두께  $T_1$ 이 24mm인 그림(9) ①의 경우 이 적용규격을 따르면 평판step의 폭  $W$ 는 20mm가 된다.

강판두께가 40mm인 경우는 그림(9) ②

에서 Film측 배치와 선원측배치 ○에는 꽤 차이가 있으며, 평판step을 Film측에 배치하는 경우에는 이 폭  $W$ 에서 선질인자의 값이 90%가 확보되었다.

Co-60을 써서 강판두께  $T_1=40\text{mm}$  및  $T_1=56\text{mm}$ 의 경우 평판step에 의한 상질평가치  $E_u$ 와 평판step의 폭  $W$ 와의 관계를 실험으로 구한 결과는 그림(10) ① 및 ②와 같다.

얻어진 결과는 Ir-192와 같이, 평판step을 Film 측에 배치하면 평판step의 폭은 약 25mm이상의 것을 사용해도 충분하다.

이상에서와 같이, Ir-192 및 Co-60의 경우에도 평판step을 Film측에 배치하면 표 (3)에 보인 적용구분으로 사용하는 것에 의해 실용적인 size의 평판step에 의해 상질평가치에서 선질인자를 구하는 것이 가능하다.

Table. 3 Width and thickness of step plate for X-ray examination  
( $T_1$ : steel palte thickness, unit: mm)

Thickness range	$T \leq 20.0$	$20.0 < T_1 \leq 35.0$	$35.0 < T_1$
Width	15.0	20.0	25.0
Thickness	1.0	2.0	4.0

## 7. 결 어

이상에서,  $\gamma$ -선투과시험에 있어서의 투과사진의 상질평가에 대한 새로운 Approach로서 평판step에 의한 실험으로 선질인자를 구하는 자료를 소개하였다.

얇은 강판등을 촬영함에 있어서 현장의 국내 기술진에게 다소라도 참고가 될 것을 기대한다.

## 참고자료

- 1) Journal of JSNDI : Vol, 43 No.6 444~451p.
- 2) Journal of JSNDI : Vol, 41 No.5 251~590p.

