

보일러튜브 용접부에 대한 방사선 선원의 최적화 연구

박상기·안연식·길두송

The Study on Radiation Source Optimization for Boiler Tube Weldments

Sang-Ki Park, Yean-Shic Ahn and Doo-Song Gil

1. 서론

1895년 뢰트겐이 물질을 투과하는 엑스선을 발견하면서부터 여러 종류의 방사선이 인류에게 다방면으로 활용되기 시작하였다. 방사선은 전리 전자기파로서 무게 질량이 없는 에너지 파형으로 물질을 투과하고, 시험체 두께, 원자번호, 밀도에 따라 투과 및 흡수되는 정도가 다르게 나타나는 점을 방사선투과검사에 이용하고 있다. 방사선투과검사에 적용하고 있는 방사선으로는 엑스선과 감마선이 있으며, 엑스선(X-ray)은 고전압 전자관에서 인공적으로 발생시키는데, 에너지 세기는 고전압 전자관의 전압에 의해 결정되고 방사선량은 전류에 의해 결정된다. 즉 고전압전자관의 전압과 전류를 조절하여 검사체 사양에 적합한 방사선 노출조건을 구현할 수 있다. 그러나 엑스선 발생기의 크기 때문에 협소한 공간에서는 적용할 수 없는 문제가 있다. 감마선(γ -ray)은 방사성동위원소의 핵이 분열 붕괴되면서 발생하는 방사선으로 감마선 조사의 크기가 작고 전원이 필요없기 때문에 검사공간이 협소한 산업현장에서 널리 이용되고 있다. 그러나 방사선 에너지 세기는 방사성동위원소의 종류에 따라 결정되기 때문에 조절이 불가능하여 방사선투과영상의 상질이 엑스선에 비하여 낮은 것이 문제점이다. 현재 사용하고 있는 감마선 선원으로는 Ir-192(Iridium-192)와 Co-60(Cobalt-60)이 있으나, 주로 Ir-192가 사용되고 있다. 본 연구에서는 발전소 보일러튜브와 같이 두께가 얇은 검사체에 적합한 방사성동위원소를 선정, 적용함으로써 방사선투과영상의 품질을 향상시켜 보일러튜브 용접부 방사선투과검사의 신뢰성을 향상시키고자 한다.

2. 방사성동위원소의 종류 및 특성

방사선투과검사에 Ir-192가 모든 검사체에 대해 사용되어 왔는데, 이제는 검사체의 사양에 따라 적합한

방사선 선원의 적용이 요구된다. 따라서 방사선 적용가능한 방사성동위원소의 종류와 특징에 대하여 조사하였다.

2.1 Ir-192(Iridium-192)

Ir-192는 핵 원자로서 중성자를 흡수하여 만들어지며, 붕괴시 110.40 keV에서 1.378 MeV까지의 감마선을 방출한다. Ir-192의 특성은 반감기는 73일, 투과가능 두께범위는 철강 19~75 mm이고 감마상수는 0.48R/h,1Ci,1m 이다. Fig. 1은 Ir-192의 방사선 붕괴구조를 나타내며, Table 1은 Ir-192의 발생 에너지 분포를 나타내고 있다.

2.2 Se-75(selenium-75)

Se-75는 전자포획을 일으키며 arsenic-75로 붕괴를 하는데, 이때 14.88 keV에서 821.60 keV까지의 에너지를 가지는 감마선이 방출되고, 평균 에너지는 214.91 keV 이다. 특성은 반감기는 119일, 투과가능 두께범위는 철강 5~30 mm이며, 감마상수는 0.203R/h,1Ci,1m이다. Fig. 2는 Se-75의 방사선 붕괴 구조이며, Table 2는 Se-75 붕괴시 발생하는 감마선의 에너지별 강도이다²⁾.

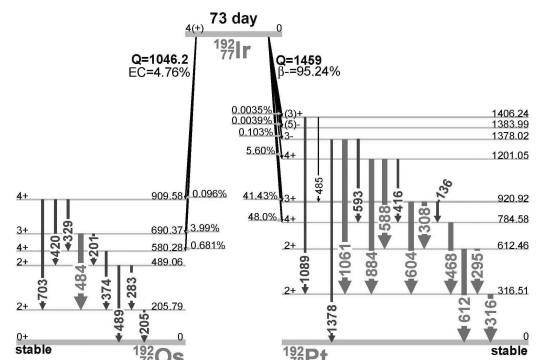


Fig. 1 Ir-192 photodisintegration

Table 1 Ir-192 radiation energy

Energy [keV]	Intensity [#decay]	Energy [keV]	Intensity [#decay]
110.40	5.817E-04	484.58	1.519E-01
136.34	1.990E-03	485.30	2.300E-05
176.98	4.300E-05	489.06	2.088E-02
201.31	2.255E-02	588.58	4.517E-02
205.79	1.592E-01	593.49	4.210E-04
280.27	9.000E-05	599.41	3.900E-05
283.27	1.268E-02	604.41	8.200E-02
295.96	2.872E-01	612.46	5.340E-02
308.46	2.968E-01	703.87	2.527E-04
316.51	8.271E-01	765.80	1.300E-05
329.17	8.296E-04	884.54	2.910E-03
374.49	3.461E-02	1061.48	5.300E-04
416.47	6.690E-03	1089.90	1.200E-05
420.52	3.290E-03	1378.20	1.200E-05
468.07	4.781E-01		

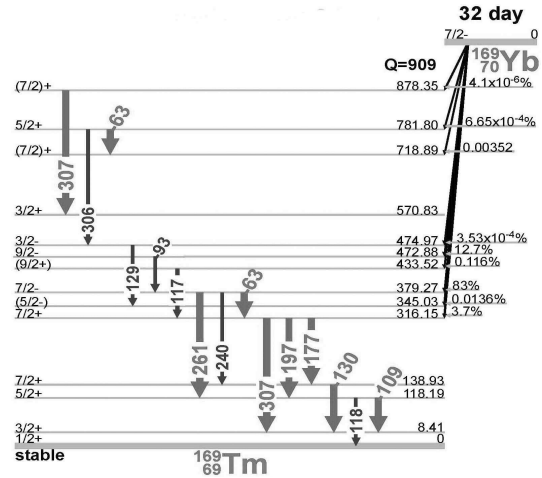


Fig. 3 Yb-169 photodisintegration

Table 3 Character of radiation source

Item	Yb-169	Se-75	Ir-192
Effectiveness energy(keV)	63~308	66~401	612~1,201
Test range(mm)	2~15	5~30	19~75
A half-life(day)	32	118.5	74
Gamma factor R/h,1Ci,1m	0.125	0.203	0.48

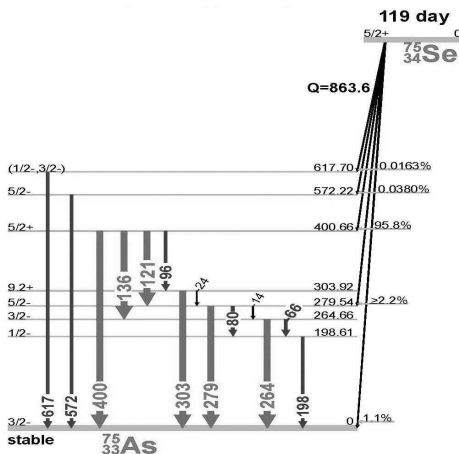


Fig. 2 Se-75 photodisintegration

Table 2 Se-75 radiation energy

Energy [keV]	Intensity [#decay]	Energy [keV]	Intensity [#decay]
14.88	1.122E-05	303.92	1.254E-02
24.38	2.575E-04	373.50	2.357E-05
66.05	1.059E-02	400.66	1.092E-01
80.94	7.294E-05	418.80	1.128E-04
96.73	3.258E-02	468.60	3.254E-06
121.12	1.638E-01	542.40	1.234E-07
136.00	5.549E-01	557.80	8.977E-09
198.61	1.408E-02	572.20	3.389E-04
249.40	8.416E-08	617.80	4.225E-05
264.66	5.611E-01	821.60	1.307E-06
279.54	2.381E-01		

2.3 Yb-169(Ytterbium-169)

Yb-169는 전자포획을 일으켜 Thulium-169으로 안

정화 되는데, 이때 발생하는 에너지는 Fig. 3과 같이 8.41 keV에서 781.64 keV까지의 감마선을 방출한다. 1 Bq의 Yb-169 붕괴시 방출되는 감마선 수는 1.42이고, 방출되는 감마선의 평균에너지는 142.454 keV이다. Yb-169는 반감기가 32일로 다른 방사성동위원소에 비해 수명이 짧으며, 감마선 방출 강도가 낮고, 저에너지의 감마선을 방출하기 때문에 얇은 두께의 검사체에 적합하며, 작업자의 방사선 피폭 위험을 줄일 수 있는 이점이 있다.

방사선 선원으로 적용될 수 있는 방사선 선원의 특성을 정리하면 Table 3과 같다.

3. 방사선 이론과 투과 상질 비교

3.1 방사선투과검사의 원리

방사선이 시험체를 투과할 경우 방사선의 흡수에 따른 강도변화는 식 1과 같다.

$$I_1 = I_{oe}^{-\mu t} = I_o \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \tag{1}$$

I_1 : 두께(t)를 투과한 방사선의 강도

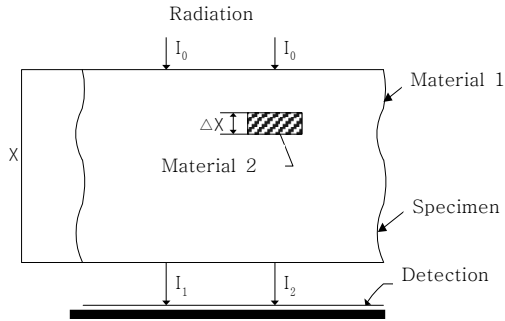


Fig. 4 Principal of radiographic test

- I_0 : 입사한 초기의 방사선 강도
- μ : 선형 흡수계이며, 단위는 cm^{-1} 이다.
- e : 대수(2.7)
- t : 시험체 두께, 일수, 년수
- T : 반가층

Fig. 4와 같이 방사선이 시험체를 투과할 경우 내부에 결함이 있으면 식 2와 같은 투과율의 차이로 인하여 필름, 영상판과 같은 영상매체를 감광시켜서 방사선투과영상을 취득하게 된다³⁾.

$$\begin{aligned}
 I_1 &= I_0 e^{-\mu x} \\
 I_2 &= I_0 e^{-\mu(x-\Delta x)} \cdot e^{-\mu \Delta x} = I_0 e^{-\mu x + (\mu - \mu) \Delta x} \\
 \frac{I_2}{I_1} &= e^{(\mu - \mu) \Delta x} = e^{-\mu x} \\
 \left(\frac{I_2}{I_1} \right) &= e^{-\mu x} = e^{-0.693 \times \frac{x}{T}} \quad (2)
 \end{aligned}$$

3.2 선원에 따른 영상의 콘트라스트 비교

화력발전소 보일러튜브 두께는 4~9 mm 범위로서 투과두께는 8~18 mm 범위이다. 기존에 적용하여온 Ir-192는 적용가능 두께범위가 19~75 mm 범위여서 보일러튜브 방사선투과검사에는 적합하지 않음을 알 수 있다. 현재 사용하고 있는 Ir-192 대신에 Se-75를 사용할 경우 영상 개선효과여부는 콘트라스트의 변화로 확인할 수 있다. 방사선투과 필름에서 미세 두께 변화에 대한 농도 변화, 즉 콘트라스트의 개선 효과는 다음 식 3으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dD}{dx} = -0.434 \delta \mu f_s \left(\frac{E_0}{d^2} \right)^{0.4346} e^{-0.434 \delta \mu x} \quad (3)$$

여기서 E_0 는 방사선 노출량, d 는 노출량 선원과 필름 간 거리, x 는 시험체의 두께, μ 는 시험체 선흡수계수, D 는 투과 필름 농도, f_s 는 필름의 감광 속도, δ 는 필름 특성곡선 기울기를 나타낸다. 위 식에 선원과 필름

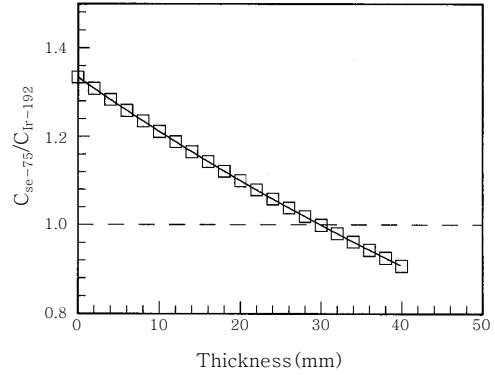


Fig. 5 Variation of contrast on thickness

간 거리와 동일한 필름을 사용한 상태에서 선원을 Se-75를 사용할 경우 Ir-192에 비교하면 아래 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{(dD/dx)_{Se-75}}{(dD/dx)_{Ir-192}} = \frac{\mu_{Se-75}}{\mu_{Ir-192}} e^{-0.434 \delta (\mu_{Se-75} - \mu_{Ir-192}) x} \quad (4)$$

식(4)에서 Ir-192의 탄소강 선흡수계수 0.035/mm와 Se-75의 선흡수계수 0.047/mm를 적용하여 계산하여 콘트라스트 비와 시험두께의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 방사선투과영상에서 콘트라스트는 영상의 품질과 밀접한 관계가 있으며, 콘트라스트가 높다는 것은 영상의 선명도가 높음을 뜻하며, Fig. 5에서 Se-75와 Ir-192의 콘트라스트 비가 시험체 두께 30 mm 이하에서는 높다는 것은 시험편의 두께가 얇은 것은 Se-75를 사용하는 것이 방사선투과영상의 품질이 향상되는 것을 보여준다⁴⁾.

4. 실험 및 결과 고찰

4.1 투과두께별 식별도 확인시험

방사선 선원별 방사선투과영상의 식별도를 확인하기 위하여 2~20mm 두께의 10개 스텝웨지(step wedge)가 가공된 시험편을 사용하였으며, 형상과 치수는 Fig. 6과 같다. 시험은 스텝웨지 시험편 위에 투과도계를 올려놓고 Ir-192, Se-75, Yb-169등 각 동위원소를 이용하여 Fig. 7의 방사선투과영상을 취득하였다. 투과영상의 각 스텝웨지에서 식별가능한 투과도계의 선지름을 측정하여 식별도를 계산하였다. 각 동위원소별 투과두께에 따른 식별도를 Fig. 8에 나타냈으며, Ir-192는 K.S, ASME 기준 2.0%를 초과하고, Se-75와 Yb-169는 기준을 만족하고 있음을 알 수 있다. Yb-169가 Se-75보다 양호한 식별도이지만 큰 차이가 없고 Yb-

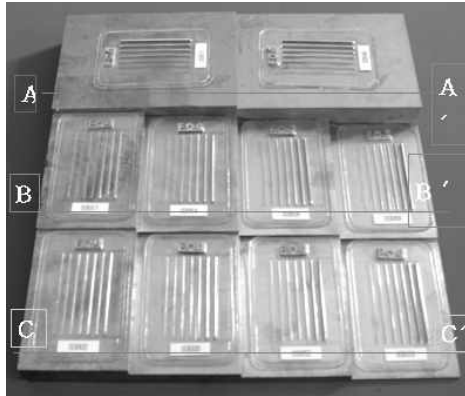


Fig. 6 Step wedge test block

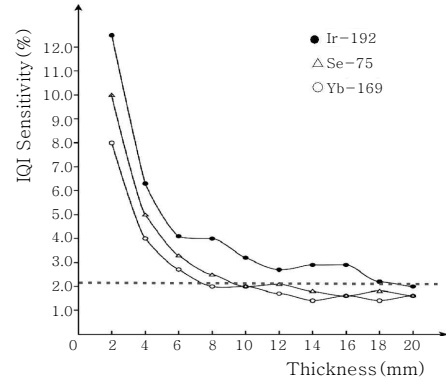


Fig. 8 Radiography Image sensitivity

과두계에서 최적합한 선원으로 확인된 Se-75를 사용하여 보일러튜브 방사선투과영상의 식별도를 비교하고자 하였다.

4.2.1 적용대상 및 방사선조사기

화력발전소 보일러튜브에 대하여 Fig. 9와 같이 방사선투과시험을 실시하였으며, 투과시험에 사용된 방사선 조사기는 Ir-192, Se-75 조사기를 사용하였으며, Fig. 10은 시험에 사용된 Se-75 선원 조사기이다. Se-75 조사기는 무게가 7.2kg으로서 Ir-192의 25kg에 비해 가벼워 작업성이 우수하다.

4.2.2 보일러튜브 투과영상의 식별도 비교

방사선투과시험에서 취득한 투과영상은 Fig. 11과 같으며, (a)는 Ir-192에 의해 취득한 투과영상으로서

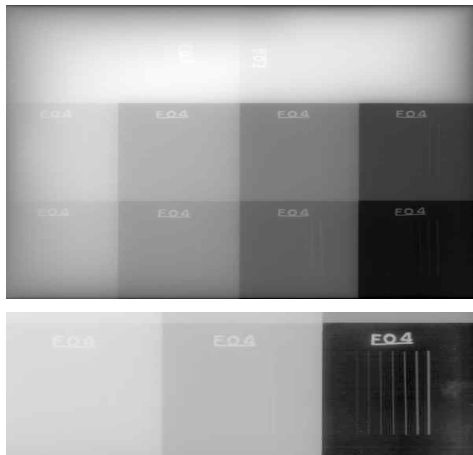
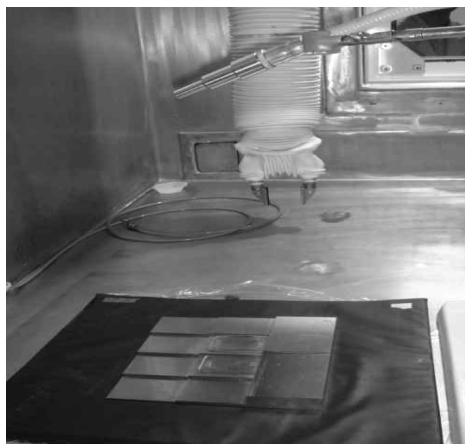


Fig. 7 Radiography test for step wedge



Fig. 9 Radiography test

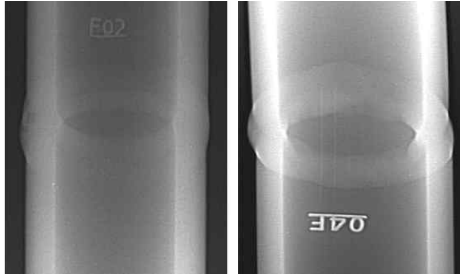
169의 방사선 노출시간이 Se-75의 2배 정도임을 감안 할 때 Se-75가 보일러튜브용 방사선 선원으로는 가장 적합한 것으로 평가되었다⁵⁾.

4.2 보일러튜브 방사선 선원의 적용

현재 보일러튜브 방사선투과검사에 적용하고 있는 Ir-192와 스텝웨지를 이용한 시험에서 보일러튜브의 투



Fig. 10 Se-75 exposure meter



(a) Image by Ir-192 (b) Image by Se-75

Fig. 11 Radiography test image

Table 4 Image quality sensitivity of test result

Source	Visible line(mm)	Tube penetrating thickness	Image quality indicator sensitivity(%)
Ir-192	0.32	16	2.0
Se-75	0.16	16	1.0

투과도계 식별선 0.32 mm가 확인되었다. (b)는 Se-75에 의해 취득된 영상으로 투과도계 식별선 0.16 mm가 확인되었다. Se-75로 시험한 투과영상이 Ir-192로 시험한 영상에 비하여 식별도가 2배 정도 우수한 것임을 알 수 있다. Table 4는 보일러튜브 방사선시험 결과 투과영상의 식별도를 나타낸다.

5. 결 론

방사선투과영상의 상질을 좋게 하기 위해서는 검사체의 두께에 적합한 방사선 에너지를 노출시켜주어야 하는데, 산업설비의 방사선투과검사에 Ir-192 만을 주로 적용되어 왔다. 화력발전소 방사선투과검사에서도 보일러튜브가 비교적 얇은 두께임에도 Ir-192를 일괄적으로 적용하여 왔는데, 이번 연구결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 스텝웨지를 이용한 얇은 두께의 방사선 선원의 적합성을 확인시험 결과 투과두께가 30 mm 이하에서는 기존에 사용해 왔던 Ir-192에 비하여 Se-75와 Yb-169가 우수한 방사선투과영상 품질을 구현할 수 있었다.

2) 보일러튜브 용접부 방사선투과시험에서 기존에 사용하여왔던 Ir-192와 Se-75의 방사선투과영상의 식별도를 비교한 결과, Ir-192를 사용한 투과영상에서는 투과도계 식별선 0.32 mm가 검출되었으나, Se-75를 사용한 투과영상에서는 0.16 mm의 식별선이 확인됨으로서 기존에 비해 2배 이상 정밀한 영상을 구현할 수 있으므로 향후 보일러튜브 검사에는 Se-75로 대체하여 적용되어야 한다.

3) Se-75를 적용함으로써 조사기의 무게가 가볍고, 방사선 에너지가 낮아 검사자들의 작업성이 향상되고 방사선 피폭량을 줄일 수 있는 이점이 있음을 확인하였다.

이상의 결과와 같이 그동안 검사체의 두께가 얇고 두꺼운 것에 관계없이 방사선 선원으로는 거의 Ir-192가 적용되어 왔으나, 본 연구결과 두께가 얇은 시험체에 대해서는 에너지가 낮은 방사선 선원을 적용하는 것이 방사선투과영상의 식별도를 향상시키는 것으로 확인됨으로서 이제 방사선 선원을 일괄적용 하는 것을 지양하고 검사체의 두께에 적합한 방사선 선원을 선정하여 적용하는 것이 요구된다. 끝.

참 고 문 헌

- Patrick O, Moore, 2006, American Society for Non-destructive Testing Chapter 7 Principle of Film Radiography, 140~150
- American Society for Nondestructive Testing, 2006, Nondestructive Testing Handbook Volume 4 Radiographic Testing Third Edition, Selection of Radiographic Source 74~78
- Lee Ey Jong, The Korean Nondestructive Testing Publication Gold, Radiography Test 2005. 51~65, Korean
- Lee Sung Shik, Im Sung Jin, Han Hyen Soo, 2001, Development Radiography Testing Method for Using Se-75, The Korea Society For Nondestructive Testing, Spring Science Meeting Book, 40~46, Korean
- Park Sang Ki, Lee Yeang Ho, The Study on Image Sensitivity Evaluation for Digital Radiography Image, Journal of the Korea Society for Power System Engineering, 12~6



·박상기
·1958년생
·전력연구원
·용접구조물 신뢰도평가
·e-mail : skpak@kepri.re.kr



·길두송
·1968년생
·전력연구원
·발전설비 건전성평가 연구
·e-mail : kds6801@kepri.re.kr



·안연식
·1958년생
·전력연구원
·발전설비 건전성평가업무 총괄
·e-mail : ysas@kepri.re.kr