

고농축 표적을 이용한 비파괴검사용 ^{192}Ir 미세초점선원 개발

Development of ^{192}Ir Small-Focal Source for Non-Destructive Testing Application by Using Enriched Target Material

손광재*†, 홍순복*, 장경덕*, 한현수*, 박울재*, 이준식*, 김동학*, 한근대**, 박춘득***

K. J. Son*†, S. B. Hong*, K. D. Jang*, H. S. Han*, U. J. Park*, J. S. Lee*,
 D. H. Kim*, K. D. Han** and C. D. Park***

초 록 하나로와 동위원소 생산시설을 활용하여 비파괴검사용 ^{192}Ir 미세초점선원의 생산기술을 개발하였고 현장적용시험을 통하여 개발된 제품의 성능을 확인하였다. 직경 0.5 mm × 높이 0.5 mm인 선원의 개발을 위해 알루미늄 캡슐 압착 방법 및 장치를 개발하여 표적을 제작하였으며, 하나로를 이용한 방사능 생성량을 평가한 결과 약 3.0 Ci 방사능의 선원 제조가 가능함을 확인하였다. 또한 컴퓨터 CPU 및 탄소강에 대한 비파괴검사를 실시하여 투과도계 감도 및 기하학적 불선명도가 비교 대상 선원에 비해 우수함을 확인하였다. 이 선원의 초점크기는 기존의 선원에 비해 매우 작기 때문에 근접 및 접촉촬영과 튜브-튜브시트 용접부의 비파괴검사에 있어 기하학적 불선명도를 최소화 할 수 있을 것이다.

주요어어: 미세초점선원, 방사선투과검사, 이리듐-192, 하나로

Abstract A ^{192}Ir small-focal source has been developed by using the HANARO reactor and the radioisotope production facility at the Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI). The small-focal source with the dimension of 0.5 mm in diameter and 0.5 mm in length was fabricated as an aluminum-encapsulated form by a specially designed pressing equipment. For the estimation of the radioactivity, neutron self-shielding and γ -ray self-absorption effects on the measured activity was considered. From this estimation, it is realized that ^{192}Ir small-focal sources over 3 Ci activities can be produced from the HANARO. Field performance tests were performed by using a conventional source and the developed source to take images of a computer CPU and a piece of a carbon steel. The small-focal source showed better penetration sensitivity and geometrical sharpness than the conventional source does. It is concluded from the tests that the focal dimension of this source is small enough to maximize geometrical sharpness in the image taking for the close proximity shots, pipeline crawler applications and contact radiography.

Keywords: Small-Focal Source, Radiographic Test, Iridium-192, HANARO

1. 서론

고도의 안전성을 요구하는 제품의 품질관리 및 구조물의 안전관리를 위하여 방사성동위원소를 이용한 비파괴검사가 널리 사용되고 있다. 특히, 평균

에너지 400 keV의 감마선을 방출하는 ^{192}Ir 선원은 발전설비, 교량, 선박, 석유화학 플랜트 등의 결함 검출 및 수명예측 검사 등의 분야에서 광범위하게 응용되고 있다[1]. 한국원자력연구소는 50 ~ 100 Ci의 방사능을 갖는 비파괴검사용 ^{192}Ir 밀봉방사선원

을 개발하여 국내공급은 물론 아시아 10여 개국에 수출하고 있다. 이 선원은 직경은 2.7 ~ 3 mm 높이 0.25 mm의 이리듬 디스크 5 ~ 10매를 포개어 밀봉 조립하는 방법을 사용하여 제작되고 있기 때문에 이 선원의 초점크기는 최대 3.9 mm 이다[2-4].

방사선투과 비파괴검사 분야의 기술개발 동향은 상질(image quality) 개선에 초점을 두고 있으며 방사선원의 크기가 작을수록 물체의 윤곽이 뚜렷하게 구현되므로 정밀하고 복잡한 부품 소재의 검사를 위해서는 선원의 크기가 작을수록 유리하다[5]. 해외 선진 업체들은 현장에서 요구하는 영상의 선별도 즉, 상질을 높이기 위하여 초점의 크기가 작은 방사선원의 개발 및 자동생산에 많은 투자를 하고 있는 실정이다. 기존선원에 비하여 초점의 크기가 0.7 mm로 매우 작은 미세초점 ^{192}Ir 비파괴검사용 선원은 소형 기계부품 및 전자부품 등의 내부 구조 파악 및 결함검출에 활용되어 생산제품의 품질향상 등의 목적으로 사용되고 있으며 선원의 수요량도 증가할 것으로 예상된다. 현재, 미세초점선원은 전량 수입에 의존하고 있는 실정이어서 비용증가 및 적기공급 지연 등 관련기술 개발에 장애를 초래하고 있다. 따라서 이미 개발된 ^{192}Ir 선원의 제조기술을 기반으로 미세초점 ^{192}Ir 비파괴검사용 선원을 개발하였다.

본 연구에서는, 기존 ^{192}Ir 선원에 비해 초점 크기가 작아 상 분해능이 우수한 미세초점선원의 생산을 위한 표적 제작 기술, 중성자 조사기술 및 선원 밀봉 조립 기술을 개발하였다. 또한, 제작된 시제품의 현장 적용성 시험을 실시하였고 이를 통하여 개발한 선원의 성능 및 안전성을 입증하였다.

2. ^{192}Ir 의 핵적 특성 및 방사능 생성량 평가

2.1. ^{192}Ir 생성반응 및 수율

미세초점 선원을 제작하기 위한 ^{192}Ir 는 원자로에서 농축 이리듬의 (n, γ) 반응을 이용하여 생성시킨다. 기존 ^{192}Ir 선원은 천연 이리듬을 사용하지만 미세초점선원의 경우에는 그 체적이 너무 작기 때문에 ^{191}Ir 이 80%까지 농축된 표적을 사용하여 생성 방사능량의 증대를 도모하였다. 천연 이리듬중에는 ^{191}Ir 이 37.3%, ^{193}Ir 이 62.7%가 포함되어있다. 농축 표적은 자연 성분비의 Ir 금속을 기체상의 화합물로 변환한 후 원심분리법으로 ^{191}Ir 동위원소를 농

축한 후 이 기체를 다시 금속으로 환원하여 원하는 농축도의 ^{191}Ir 금속을 얻는다. $^{191}\text{Ir}(n, \gamma)^{192}\text{Ir}$ 반응에 대한 열중성자 방사화 단면적은 ^{192m}Ir 이 생성되는 효과를 포함하여 940 barn이다. 이때 생성된 ^{192}Ir 는 다시 1000 barn의 높은 단면적으로 중성자를 흡수하여 ^{193}Ir 을 생성한다. 이렇게 생성된 ^{192}Ir 는 반감기 74.4일로 95.5%는 베타입자 (0.672 MeV = 46%, 0.536 MeV = 41%, 0.24 MeV = 8%) 방출 후 0.604, 0.468, 0.308 MeV의 주요에너지 외에 8개의 에너지를 지닌 감마선을 방출하여 안정한 ^{192}Pt 가 되고, 나머지 4.4% 정도는 캐도전자 포획 (EC) 후 약 22종의 감마선을 방출하여 안정한 ^{192}Os 가 되는 붕괴를 한다. 방출하는 감마선의 평균에너지는 0.48 MeV 정도이다.

표적핵의 중성자 방사화에 의한 ^{192}Ir 의 생성 비방사능은 다음 식으로 계산될 수 있다[6].

$$S_0 = \frac{N\sigma_A\phi}{3.7 \times 10^{10} \left\{ 1 + \frac{(\sigma_B - \sigma_A)\phi}{\lambda} \right\}} \left\{ e^{-\sigma_A\phi t} - e^{-(\lambda + \sigma_B\phi)t} \right\} \quad (1)$$

여기서, S_0 생성된 ^{192}Ir 에 의한 비방사능, Ci/g
 N 단위질량 (g) 당 표적핵 (^{191}Ir)의 수, n
 σ_A ^{191}Ir 의 열중성자 포획단면적, cm^2
 σ_B ^{192}Ir 의 열중성자 포획단면적, cm^2
 ϕ 열중성자속 밀도, $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
 t 중성자 조사시간, s
 λ ^{192}Ir 의 붕괴상수, s^{-1}

2.2. 이리듬의 중성자 자기차폐 효과

방사성동위원소의 생성수율은 중성자 자기차폐효과 (neutron self-shielding effect)에 의해 식(1)을 통해 예측된 값보다 다소 줄어들게 된다[7,8]. 일반적으로, 중성자 자기차폐효과는 그 물질의 열중성자 방사화 단면적과 비례하는 경향이 있다. 따라서 보다 정확한 ^{192}Ir 의 생성량을 예측하기 위하여 식 (1)에 의해 구해진 생성수율은 중성자 자기차폐효과를 고려하여 보정되어야 한다. 임의의 형상을 갖는 표적에 대하여 중성자 자기차폐가 없을 때의 반응수율을 1로 하면 중성자 자기차폐인자는 다음 식으로 주어진다[8,9].

$$h = \frac{1}{2\epsilon} \{1 - e^{-2\epsilon}\} \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{2N_1\sigma V}{S} \quad (3)$$

여기서, h 중성자 자기차폐인자
 N_1 원자밀도, n/cm^3
 σ 열중성자 포획단면적, barn
 V 표적의 부피, cm^3
 S 표적의 표면적, cm^2

2.3. 이리듐의 γ 선 자기흡수 효과

^{192}Ir 로부터 방출되는 γ 선의 일부분은 높은 밀도를 갖는 이리듐 금속표적 자체에 흡수되고 나머지만 외부로 방출된다. 따라서 표적자체에 의한 방사선 차폐효과인 γ 선 자기흡수를 방사능 생성량 예측에 반영하여야 한다. 선원내의 ^{192}Ir 분포가 균일한 평판형 선원의 경우를 가정하면 γ 선 자기흡수인자는 다음 식으로 주어진다[10].

$$f = \frac{(1 - e^{-\mu x})}{\mu x} \quad (4)$$

여기서, μ 는 ^{192}Ir 에서 방출되는 γ 선의 물질내 유효흡수계수로서 약 3.995 cm^{-1} 정도이며, x 는 물질의 두께이다. 직경과 높이가 같은 실린더형 표적은 구형선원으로 근사시킬 수 있어 다음 식으로 γ 선 자기흡수인자를 계산할 수 있다[11].

$$f = \frac{3}{4(\mu r')^2} \left\{ \mu r' + e^{-2\mu r'} - \frac{1}{2\mu r'} (1 - e^{-2\mu r'}) \right\} \quad (5)$$

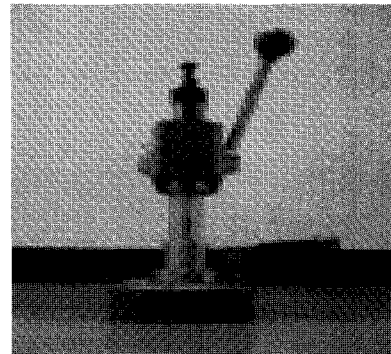
여기서 직경과 높이가 같은 원주형 선원의 반지름이 r 일 경우 $r' = (3/2)^{1/3}r$ 로 주어지는 유효반지름이다.

3. 선원의 제조

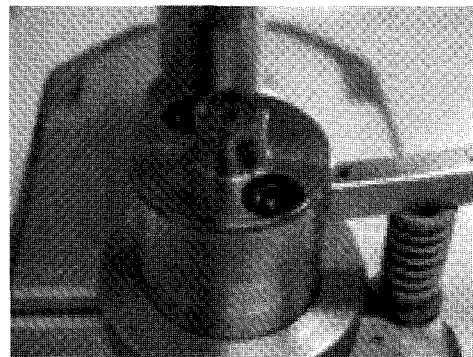
3.1. 표적의 제작

본 연구에서는 선원의 초점크기가 0.7 mm가 되도록 하기 위하여 직경 0.5 mm, 높이 0.5 mm이고

^{191}Ir 이 80%로 농축된 이리듐 금속 펠렛을 표적으로 사용하였다. 이 이리듐 표적은 너무 작기 때문에 핫셀 내에서 매니퓰레이터로 취급하기가 매우 까다롭다. 또한, 기존 선원 캡슐에 삽입하였을 경우 유격이 커서 선원이 캡슐내부에서 고정되지 않는다. 따라서 직경 3 mm, 높이 3 mm의 원통모양의 알루미늄 캡슐에 이리듐 펠렛을 삽입하고 압착하는 시스템을 제작하였다. 알루미늄 캡과 캡슐은 소성가공법을 사용하여 제작하였고 캡슐의 중앙에 이리듐 표적을 고정하기 위한 표적 조립 압착 시스템을 개발하였다. Fig. 1은 개발된 조립압착시스템을, Fig. 2는 매우 작은 이리듐 표적을 고정하기 위하여 제작된 알루미늄 캡과 캡슐이 조립된 모습과 단면사진이다.



(a)



(b)

Fig. 1 Photographs of compacting equipment (a) overall and (b) details of compacting parts

3.2. 중성자 조사 및 선원 밀봉 조립

^{192}Ir 미세조점선원의 방사능 생성량을 실험적으로 평가하기 위하여 금속 이리듐 선원을 포함하고 있는 4개의 알루미늄 표적을 제작하였다. 표적은

열중성자속이 3×10^{14} [$n \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$] 인 하나로의 IR-2 조사공에서 23일 동안 중성자를 조사하였다. 조사된 표적은 10일 동안 냉각한 후 콘크리트 핫셀로 이동하여 방사능을 측정하였다.

^{192}Ir 미세초점선원을 만들기 위해 방사화된 이리듐 펠렛이 내장된 알루미늄 캡슐을 기존 ^{192}Ir NDT (nondestructive testing) 선원 캡슐에 삽입하고 밀봉하여 제작하였다. 기존 선원 캡슐의 규격을 채용할 경우, 가장 널리 사용되는 조사기의 사용이 가능하기 때문에 NDT 시장에서 더 쉽게 채택될 수 있는 장점이 있다. 선원의 밀봉 조립은 기존 선원의 밀봉 조립 방식인 이중 밀봉 구조와 GTA (gas tungsten arc) 용접을 사용하였다. 중성자 라디오그래피를 통해 밀봉 조립 후 용접부의 기계적인 건전성을 확인하였다. Fig. 3는 선원 제작전 설계도와 제작후 미세 초점 선원의 중성자 라디오그래피 필름을 보여준다.

4. 현장 적용성 시험

선원의 초점 크기가 작아지게 되면 기하학적 불선명도가 작아져서 명료도를 개선하게 되고 결국에는 우수한 상질의 방사선투과 필름을 얻을 수 있게 된다. 방사선투과 비파괴검사에서 검사 이미지의 상질에 영향을 주는 인자 중에 선원 자체가 가지는

것은 선원의 방사선 질 (radiation quality)과 초점 크기이다[12]. 즉 선원의 초점 크기가 작을수록 더 좋은 상질을 얻을 수 있다. 본 연구를 통하여 개발된 미세초점 ^{192}Ir 비파괴검사용 선원은 선원의 기하학적 크기가 직경 0.5 mm × 높이 0.5 mm 로서, 기존 선원의 2 ~ 3 mm 보다 작아 우수한 방사선투과 필름의 상질을 얻을 수 있을 것으로 기대되었다. 컴퓨터 CPU와 9 mm 두께의 탄소강을 시험 대상으로 방사선투과 비파괴검사시험을 실시하였고 이때 사용된 선원의 규격은 Table 1에 보인 바와 같다. 방사선투과필름의 촬영시에 노출시간을 결정하는 요소는 선원의 강도, 선원-필름간 거리, 대상체의 두께 등이다. 비교시험에서는 동일한 촬영배치 및 대상체에 대한 비교시험이기 때문에 두 선원의 강도비인 11.6배로 노출시간을 달리하여 시험하였다.

Table 1 Source specifications of small-focal and reference sources for comparing NDT experiments

Spec.	Source type	
	Small focal	Reference
Serial No.	IRS100/N060252	424-9/2590B
Activity	1.2 Ci	14.0 Ci
Projector	A660/3755	A660/3725
Focal size	0.5 x 0.5 mm	1.125 x 3.0 mm

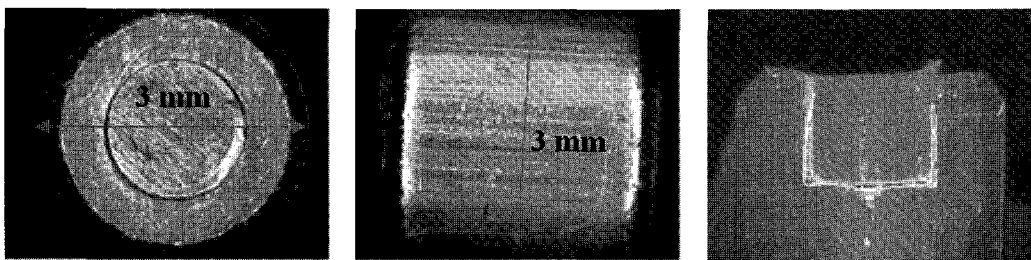


Fig. 2 Photographs of target; (a) upper view, (b) side view and (c) cross-section of target

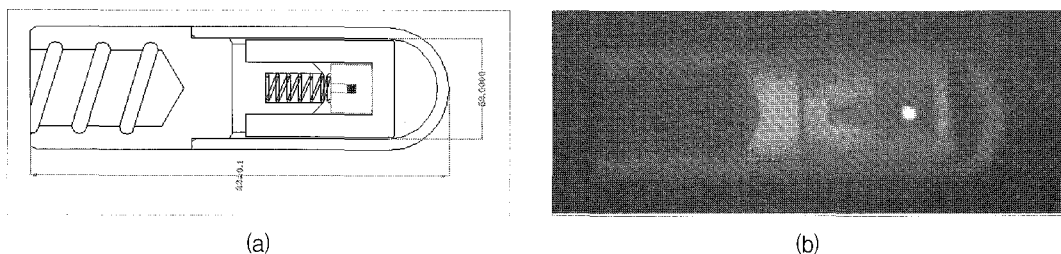


Fig. 3 Internal inspection results, (a) schematic drawings of source capsule, (b) neutron radiography film of source

5. 결과 및 고찰

5.1. 방사능 생성량 평가

연구용 원자로인 하나로의 여러 조사공에서 표적 물질을 중성자 조사 할 때에 대한 방사능 생성수율을 식 (1)을 이용하여 계산하였고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 계산 결과 하나로에서 가장 높은 방사능을 효과적으로 생성하기 위해서는 중성자속이 높은 CT나 IR조사공에서 1회 운전주기인 23일 정도 중성자 조사하는 것이 바람직할 것으로 평가되었다. 실제 방사능 생성량은 중성자 자기흡수효과 및 감마선자기차폐효과 등에 의해서 식 (1)에 의해 예측된 값에 비하여 작은 값을 갖는다. 중성자 자기흡수효과 및 감마선 자기차폐효과를 식 (2) ~ 식 (5)를 사용하여 평가한 결과 중성자 자기흡수인자는 0.4699이고 감마선 자기차폐인자는 0.8649로 계산되었다. 이 두 효과를 모두 고려하면 생성방사능량은 총생성량의 40.6% 이다.

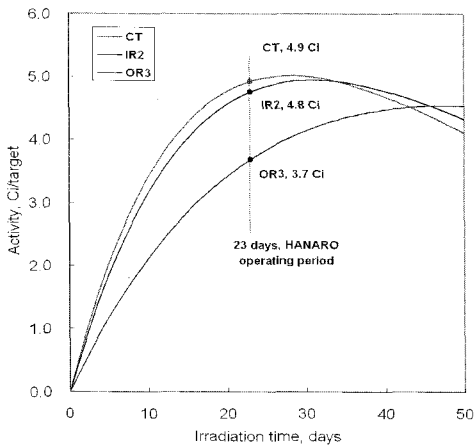


Fig. 4 Specific activity of ¹⁹²Ir in accordance with irradiation time and thermal neutron flux

4개의 표적을 중성자 조사한 후 측정된 방사능 값과 예측한 값을 Table 2에 나타내었다. 측정결과 평균 방사능은 선원 당 1.945 Ci였고 이를 조사 직후 값으로 환산하면 2.14 Ci 이다. 식 (1) ~ 식 (5)에 의해 계산된 값은 선원 당 조사 직후에 1.93 Ci로 실제 생성량과 계산값은 10% 내에서 일치함을 알 수 있다. 따라서 하나로를 활용하여 약 2 ~ 3 Ci의 방사능을 가지며 초점크기가 0.7 mm인 ¹⁹²Ir 미세초점선원을 생산할 수 있을 것으로 평가되었다.

5.2. ¹⁹²Ir 미세초점선원의 현장 적용성 시험

비교 대상인 두 선원을 사용하여 컴퓨터 CPU에 대한 비파괴검사를 실시하였다. 선원-필름거리는 500 mm, 현상조건은 20℃ 5분을 적용하였다. Fig. 5에 보인 바와 같이, 본 연구를 통하여 개발된 미세초점선원을 사용하여 촬영한 필름의 명료도가 기준선원에 비하여 우수함을 알 수 있다.

두께 9.0 mm인 탄소강 시험편의 선원-필름거리는 500 mm, 시험편과 필름은 접촉시켜 배치하였고 현상조건은 20℃, 5분으로 CPU 촬영의 조건과 동일하다. 투과도계는 KS-0896의 F02형을 사용하였으며 탄소강 시험편 상부에 부착하였다. 미세초점 선원을 사용한 경우 세부윤곽이 더 우수하며, 식별 가능한 투과도계의 선은 기준선원의 경우 2개, 대상선원의 경우 3개로 확인되었다. 이를 투과도계 감도로 환산하여 보면, 기준선원은 3.56%이고 미세초점선원은 2.78%로 미세초점 선원을 사용한 경우에 개선된 투과도계 감도를 확인할 수 있다.(Fig. 6)

기하학적 불선명도의 영향을 확인하기 위하여 탄소강 시험편의 촬영배치를 달리하여 촬영하였다. 선원과 필름과의 거리는 500 mm로 동일하나 필름과 시험체와의 거리를 접촉에서 120 mm 까지 늘

Table 2 Measured and estimated result of radioactivity

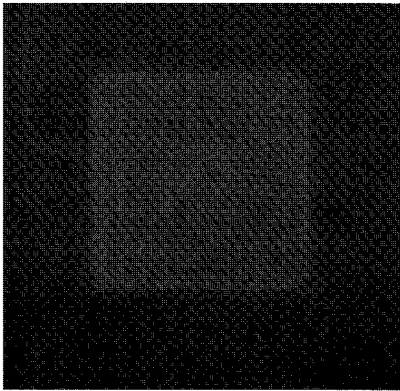
Measured Activity, Ci		Calculated Activity, EOB (Ci)	
Measurement	EOB**		
1.99	2.18	4.76 without loss effects	1.93 considering neutron & gamma ray self shielding effects
1.82	1.99		
2.04	2.24		
1.93	2.13		
1.95 (mean value)	2.14 (mean value)		

* Measuring date : 2. 6. 2006 (10 days after EOB)

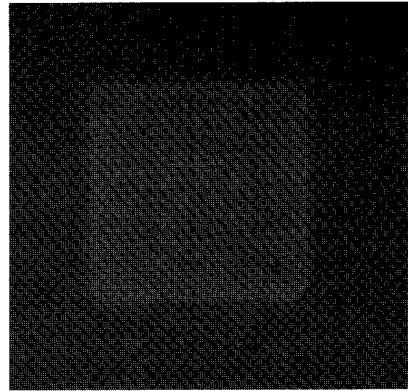
** End of Bombardment : 1. 27. 2006

인 후에 시험을 실시하였다. 선원, 필름 및 시험체의 배치는 Fig. 7(a)에 보인 바와 같다. 이때 기하학적 불선명도 U_g 는 선원의 크기 F 와 피사체와 필름간의 거리 t , 피사체와 선원간의 거리 D 에 의해 $U_g = F(t/D)$ 로 계산되며 이때 결과 값은 기준선원이 0.95 mm 이고 미세초점선원이 0.16 mm로 나타났다. 선원의 크기와 기하학적 불선명도는 비례하므로, 동일한 SFD (source to film distance)에 대해서 두 선원의 기하학적 불선명도의 비가 6:1 정도

이다. 따라서 미세초점선원을 기준선원에 비해 SFD가 1/6 정도로 근접해서 촬영해도 거의 동일한 상질이 있음을 의미한다. 이 경우에 노출시간은 약 1/36 정도로 줄일 수 있을 것으로 기대되기 때문에 동일한 기하학적 불선명도를 얻기 위해서는 노출시간의 차이가 별반 없을 것으로 판단된다. 이러한 경우, 방사선 차폐가 더 용이하여 미세초점선원의 사용에 장점이 있다. 시험결과 기하학적 불선명도의 영향으로, Fig. 7(b)의 기준선원을 사용한 방

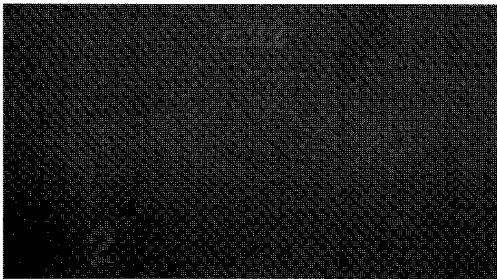


(a) reference source

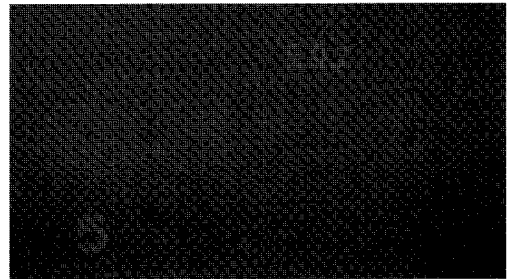


(b) small-focal source

Fig. 5 Images of radiographic films for computer CPU chip

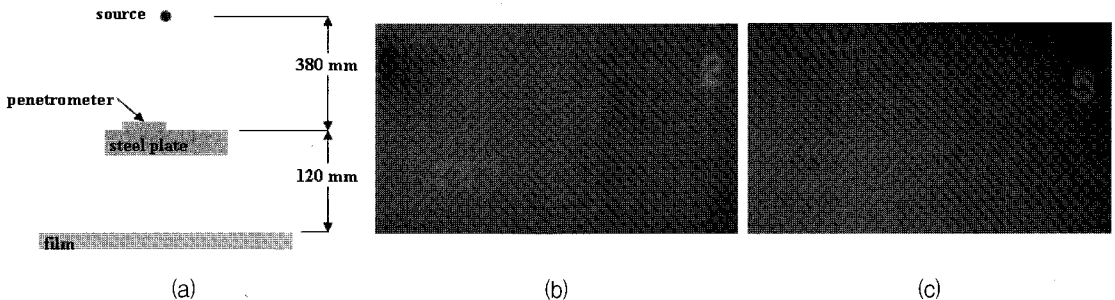


(a) reference source



(b) small-focal source

Fig. 6 Images of radiographic films for carbon steel specimen



(a)

(b)

(c)

Fig. 7 Test for geometrical unsharpness, (a) arrangement of source, film and specimen, (b) film image of reference source, (c) film image of small-focal source

사선촬영에서는 투과도계의 선이 거의 확인되지 않은 반면, Fig. 7(c)의 미세초점선원을 사용한 경우에는 세 번째의 선이 확인되었다. 이것은 선원의 크기가 작음으로써, 기하학적 불선명도가 개선되어 방사선필름의 상질이 매우 우수하다는 것을 나타낸다.

6. 결론

^{191}Ir 이 80%로 농축된 표적을 사용하여 비파괴검사용 ^{192}Ir 미세초점선원을 개발하였다. 알루미늄 캡슐 압착방법 및 장치를 개발하여 중성자 조사를 위한 표적을 제작하였으며, 중성자 조사시험 및 중성자 자기차폐효과와 감마선 자기흡수효과를 고려하여 방사능 생성량을 평가한 결과 하나로를 활용하여 약 3.0 Ci의 선원 제조가 가능함을 확인하였다. 또한 컴퓨터 CPU 및 탄소강에 대한 현장 시험을 한 결과 투과도계 감도 및 기하학적 불선명도가 비교대상 선원에 비해 우수하였다. 개발된 선원은 고분해능의 영상이 요구되는 전자산업분야, 우수한 상질을 요구하는 원자력 발전산업분야, 기타 발전 및 항공분야 등에 적용하면 보다 신뢰도 높은 방사선투과검사가 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] H. S. Han. et al., "Production of ^{192}Ir radiation sources using HANARO" (in Korean), Radioisotope News, Vol. 13, No. 1, pp. 23 (1998)
- [2] H. S. Han, W. K. Cho, U. J. Park, Y. D. Hong and K. B. Park, "Current status and future plan for the production of radioisotopes using HANARO research reactor," Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 257, No. 1, pp. 47-51 (2003)
- [3] H. S. Han. et al., "Development of radioisotopes and radiation sources," KAERI/RR-2349/2002
- [4] K. J. Son, J. S. Lee, U. J. Park, S. B. Hong, K. S. Seo and H. S. Han, "Development of miniature radiation sources for medical and non-destructive testing applications, IAEA CRP meeting on development of radioactive sources for emerging Therapeutic and Industrial Applications," Vienna, 2005
- [5] 이성식, 김영환, "Tangential Radiography를 이용한 배관의 두께 평가법", 한국비파괴검사학회지, 제18권 3호, pp. 205-210 (1998)
- [6] Hisashi Katoh et al., "Production of radioisotopic gamma radiation sources in JAERI," JAERI/M-8810(1980)
- [7] J. Gilat and Y. Gurfinkel, "Self-shielding in activation analysis," Nucleonics, Vol. 21, No. 8, pp. 143 (1963)
- [8] W. K. Cho, "Development of Ir-192 brachytherapy sources for medical uses," KAERI Report (1996)
- [9] R. E. Nisle, Nucleonics, Vol. 18, No. 3, pp. 86 (1960)
- [10] S. Enomoto, T. Onodera and H. Kato, "Gamma-ray self-absorption of ^{192}Ir radiographic source," J. of Japanese Nuc. Soc., Vol. 12, No. 4, pp. 176 (1970)
- [11] W. R. Dixon, "Self-absorption correction for large gamma-ray source," Nucleonics, Vol. 8, No. 4, pp. 68 (1951)
- [12] "Nondestructive testing overview," Nondestructive Testing Handbook, Second Edition, Vol. 10, ASNT, (1996)