

하나로를 이용한 비파괴검사용 ^{169}Yb 저에너지 밀봉선원 개발

Development of ^{169}Yb Low-Energy Sealed Source for Nondestructive Testing Applications Utilizing HANARO

손광재*[†], 홍순복*, 장경덕*, 한현수*, 박을재*, 이준식*, 서기석*, 한인수*, 조운갑**, 이성식***

K. J. Son*[†], S. B. Hong*, K. D. Jang*, H. S. Han*, U. J. Park*,
 J. S. Lee*, K. S. Seo*, I. S. Han*, W. K. Cho** and S. S. Lee***

초 록 본 연구에서는 하나로 및 동위원소생산시설을 활용하여 비파괴 검사에 사용되는 ^{169}Yb 선원의 생산 기술을 개발하였다. 천연 존재비 0.14%의 ^{168}Yb 을 20% 까지 농축한 Yb_2O_3 분말을 표적물질로 사용하였고 이 물질의 방사화를 위하여 펠릿 성형기술 및 장치를 개발하였다. 중성자 조사를 위한 표적캡슐 및 기존 ^{192}Ir 선원 조사기에 사용이 가능한 선원 어셈블리를 설계·제작하였다. 또한, 하나로를 이용하여 약 5 Ci의 방사능 강도를 갖는 시험용 선원을 제작하여 ^{192}Ir 선원과 비파괴검사 성능을 비교 평가하여 선원의 우수함을 확인하였고 선원캡슐의 안전성시험을 실시하여 캡슐의 안전성을 검증하였다.

주요용어: ^{169}Yb 선원, 방사선투과검사, ^{192}Ir , 하나로

Abstract ^{169}Yb industrial NDT sealed sources were developed by using Yb_2O_3 pellets as the target and demonstrated for their performance. To produce the pellets, optimal compacting and sintering conditions were determined experimentally. Source holders for ^{169}Yb were designed and fabricated. After assembling an active source produced from HANARO with the developed source holder, a demonstration experiment was performed to compare the quality of the radiographs from ^{192}Ir and soft X-rays. This demonstration study showed that the developed ^{169}Yb produced better radiographs than ^{192}Ir for a carbon steel with less than a 4 mm thickness.

Keywords: ^{169}Yb Source, Radiography, ^{192}Ir , HANARO

1. 서 론

Ytterbium(Yb)은 원자번호가 70이고 희토류원소 특유의 중성자에 대한 높은 흡수단면적을 갖고 있어서 원자로조사에 의해서 높은 비방사능의 방사성 동위원소인 ^{169}Yb , ^{175}Yb , ^{177}Yb 를 생산할 수 있다. ^{175}Yb , ^{177}Yb 은 단시간 조사에 의한 방사화분석의 대상 핵종으로 이용되고 있다. ^{169}Yb 는 β 선을 방출하지 않고, 전자포획 (electron capture) 붕괴에

의해 63.12 ~ 307.73 keV의 저에너지 γ 선을 방출한다. 따라서 두께가 얇은 강판, 얇은 세관용접부의 비파괴검사용 선원으로 개발되어 왔으며 X선 장치를 사용할 수 없는 장소에서 두께 10 mm 이하의 얇은 대상에 대해서 좋은 상질을 얻을 수 있다.

1975년에 Dobrowskis 등은 ^{168}Yb 농축도 18.2 ~ 25.2%이고 직경 1 mm, 높이 1 mm인 Yb_2O_3 펠릿으로 제작된 111 GBq의 선원을 사용하여 두께 3 mm 이하의 관지름 30 mm의 관을 내부선원촬영

법(파노라마 기법) 및 2중벽 촬영법에 의해 촬영한 결과 ^{75}Se , ^{192}Ir 선원의 경우보다 우수하다는 사실을 보고하였다[1]. Pullen 등은 3.7 ~ 111 GBq의 ^{169}Yb 선원을 사용하여 스테인레스 강관을 내부선원 촬영법, 2중벽 촬영법으로 촬영하여 3 ~ 5%의 투과도계 식별도를 얻었다는 것을 보고하고 있다[2]. 또한 Dobrowolski 등은 폴란드 원자력발전소의 소구경관의 용접부위 검사에, 또 영국에서는 핵연료재처리공장 건설시의 배관용접부 검사에 그 유효성이 실증되어 실용화되었다는 보고가 있다[3].

본 연구에서는 하나로 및 동위원소생산시설을 활용하여 저에너지 비파괴 검사에 사용되는 ^{169}Yb 선원의 생산기술을 개발하였다. 천연 존재비 0.14%의 ^{168}Yb 을 20% 까지 농축한 안정농축동위원소를 포함한 Yb_2O_3 분말을 표적물질로 사용하기 위한 펠릿 성형기술 및 장치를 개발하였다. 중성자 조사를 위한 표적캡슐 및 기준 ^{192}Ir 선원 조사기에 사용이 가능한 선원 어셈블리를 설계·제작하였다. 또한, 하나로를 이용하여 약 5 Ci의 방사능 강도를 갖는 시험용 선원을 제작하여 ^{192}Ir 선원과 비파괴검사 성능을 비교 평가하여 선원의 우수함을 확인하였고 선원캡슐의 안전성시험을 실시하여 캡슐의 안전성을 검증하였다.

2. ^{169}Yb 선원의 특성 및 방사능생성량 평가

2.1. ^{169}Yb 선원의 특성

Ytterbium의 물리, 화학적 특성은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 원자로 조사중의 방사선이나 온도에 대한 조사안정성, 높은 중성자 포획 단면적에 의한 중성자 자기차폐의 영향을 줄이기 위한 분산효과, 생성방사능에 의한 주변의 오염을 피하기 위해서 물에 대한 용해도가 작고, 적당한 경도를 유지할 것 등을 고려하여 표적의 화학형은 산화물(Yb_2O_3)로 많이 사용한다.

Ytterbium의 방사성동위원소는 대략 13종정도가 되지만 원자로중성자에 의해 생성되어 방사화 분석, RI 트레이서, 비파괴검사용 선원 등으로 이용가능한 핵종은 ^{169}Yb (반감기 32일), ^{175}Yb (반감기 4.19일), ^{177}Yb (반감기 1.93시간)등 이다. 그 중에서도 ^{169}Yb 는 높은 비방사능으로 작은 선원을 만들 수 있고 또 베타선을 방출하지 않기 때문에 ^{60}Co , ^{192}Ir 등에 비교하여 반감기가 짧은 단점은 있지만 비파괴검사용 저에너지 γ -선 선원으로 우수한 특성을 가지고 있다[4].

Table 1 Physical and chemical characteristics of Ytterbium

Name of element	Ytterbium			
Symbol for element	Yb			
Atomic number	70			
Atomic weight	173.04 (g/mol)			
Crystal structure	α : 입방, β (>732 $^{\circ}\text{C}$): 체심입방			
Melting temperature	819 $^{\circ}\text{C}$			
Boiling temperature	1194 $^{\circ}\text{C}$			
Stable isotopes, %	^{168}Yb	0.14	^{173}Yb	16.2
	^{170}Yb	3.03	^{174}Yb	31.84
	^{171}Yb	14.3	^{176}Yb	12.73
	^{172}Yb	21.82		
Nuclear cross-section for thermal neutron, barn	^{168}Yb	$\phi_{th}=3470$, $\phi_f=16100$	^{169}Yb	($T_{1/2}=32\text{d}$, 3600)
	^{170}Yb	11.4 \pm 1.0		
	^{171}Yb	45.8 \pm 2.5		
	^{172}Yb	0.8 \pm 0.4		
	^{173}Yb	17.1 \pm 1.3		
	^{174}Yb	69.4 \pm 5.0	^{175}Yb	($T_{1/2}=4.19\text{d}$)
	^{176}Yb	2.85 \pm 0.05	^{177}Yb	($T_{1/2}=1.9\text{h}$)

2.2. 방사능 생성량 평가

^{169}Yb 는 원자로에서 $^{168}\text{Yb}(n,\gamma)^{169}\text{Yb}$ 반응을 이용하여 만들 수 있으며 이와 관련된 핵반응을 Fig. 1에 나타내었다. 표적물질로 사용되는 ^{168}Yb 의 자연 상태에서 존재비는 약 0.14% 정도로 매우 적어 방사능이 높은 선원을 만들 수 없기 때문에 ^{168}Yb 이 약 20% 까지 농축된 표적을 사용하여 생성방사능량의 증대를 도모하였다. 일반적으로, 전자기장을 이용한 동위원소 분리법 (electro-magnetic isotope separation)으로 ^{168}Yb 을 농축한 후 다시 산화시켜 원하는 농축도의 ^{168}Yb 산화물을 얻는다. $^{168}\text{Yb}(n,\gamma)^{169}\text{Yb}$ 반응에 대한 열중성자 방사화단면적은 3470 barn이고 이 반응에 의해 만들어진 ^{169}Yb 는 다시 3600 barn의 높은 단면적으로 중성자를 흡수하여 ^{170}Yb 를 생성한다. ^{169}Yb 의 반감기는 32일로 β 선을 방출하지 않고, EC 붕괴에 의해 63.1 keV (43.7%), 109.78 keV (17.4%), 130.5 keV (11.1%), 177.2 keV (21.5%), 197.9 keV (34.9%), 307.7 keV (10.8 %) 등의 γ 선을 방출한다. 방출하는 γ 선의 평균 에너지는 약 200 keV 정도이다[5].

표적핵의 중성자 방사화에 의한 ^{169}Yb 의 생성비 방사능은 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$\frac{dN_A(t)}{dt} = -\sigma_A \phi N_A(t) \quad (1)$$

$$\frac{dN_B(t)}{dt} = \sigma_A \phi N_A(t) - \sigma_B \phi N_B(t) - \lambda_B N_B(t) \quad (2)$$

at $t = 0$: $N_A = N_{A0}$ (3)

at $t = 0$: $N_B = 0$ (4)

여기서,

- $N_A(t)$: 시간에 따른 ^{168}Yb 의 원자 수, n
- $N_B(t)$: 시간에 따른 ^{169}Yb 의 원자 수, n
- σ_A : ^{168}Yb 의 열중성자 포획 단면적, cm^2
- σ_B : ^{169}Yb 의 열중성자 포획 단면적, cm^2
- ϕ : 열중성자속, $\text{ncm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- λ_B : ^{169}Yb 의 붕괴상수, s^{-1}
- N_{A0} : 표적물질의 ^{168}Yb 원자 수, n

식 (1) ~ (4)로부터 ^{169}Yb 의 생성 원자 수는 다음과 같이 구할 수 있다.

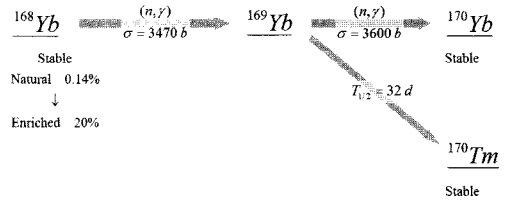


Fig. 1 Schematics of nuclear reaction for producing ^{169}Yb by using nuclear reactor

$$N_B(t) = \frac{\sigma_A N_{A0} \phi}{(\sigma_B - \sigma_A) \phi + \lambda_B} [\exp(-\sigma_A \phi t) - \exp\{-(\sigma_B \phi + \lambda_B)t\}] \quad (5)$$

생성된 ^{169}Yb 원자의 붕괴에 의한 방사능은 식 (5)에 붕괴상수를 곱하여 다음 식으로 얻을 수 있다.

$$A(Ci) = 2.7 \times 10^{-11} \frac{\sigma_A N_{A0} \phi}{(\sigma_B - \sigma_A) \phi + \lambda_B} [\exp(-\sigma_A \phi t) - \exp\{-(\sigma_B \phi + \lambda_B)t\}] \lambda_B \quad (6)$$

방사성동위원소의 생성수율은 중성자 자기차폐효과 (neutron self-shielding effect)에 의해 식 (6)을 통해 예측된 값보다 다소 줄어들게 된다[6,7]. 일반적으로, 중성자자기차폐효과는 그 물질의 열중성자 방사화단면적과 비례하는 경향이 있다. 따라서 보다 정확한 ^{169}Yb 의 생성량을 예측하기 위하여 식 (6)에 의해 구해진 생성수율은 중성자자기차폐효과를 고려하여 보정되어야 한다. 임의의 형상을 갖는 표적에 대하여 중성자자기차폐가 없을 때의 반응수율을 1로 하면 중성자자기차폐인자는 다음 식으로 주어진다[7,8].

$$h = \frac{1}{2\epsilon} \{1 - e^{-2\epsilon}\} \quad (7)$$

$$\epsilon = \frac{2N_1 \sigma V}{S} \quad (8)$$

여기서,

- h : 중성자자기차폐인자
- N_1 : 원자밀도, ncm^{-3}
- σ : 열중성자 포획단면적, barn
- V : 표적의 부피, cm^3
- S : 표적의 표면적, cm^2

3. ^{169}Yb 선원 개발

3.1. 표적 제작기술 개발

^{169}Yb 를 비파괴검사용 γ -선원으로 이용하기 위해서는 가능한 한 작은 크기의 점 선원형태로 방사능 강도가 185 GBq (5 Ci)정도가 되는 것이 좋다. ^{169}Yb 를 제조하는 방법으로는 가속기에 의한 ^{169}Tm ($d,2n$) ^{169}Yb 반응을 이용하여 무담체(carrier free)의 ^{169}Yb 를 얻을 수 있지만, 양적인 제한, 안정된 공급을 고려할 때 실용적인 방법이 아니다. 따라서 대량으로 안정된 제조 공급을 위해서는 원자료를 이용하여 $^{168}\text{Yb}_2\text{O}_3$ 표적을 중성자 조사하는 방법으로 $^{168}\text{Yb}(n,\gamma)^{169}\text{Yb}$ 반응을 이용하여 제조하는 것이 가장 효과적이다. 그러나 자연 상태의 ytterbium에는 ^{168}Yb 동위원소가 0.14% 밖에 함유되어 있지 않아서 그대로는 필요한 방사능강도를 갖는 소형선원을 얻을 수가 없다. 따라서 ^{168}Yb 동위원소 존재비를 20% 까지 농축한 $^{168}\text{Yb}_2\text{O}_3$ 를 표적물질로 고려하였다. 천연 ytterbium의 동위원소 존재비와 표적으로 사용한 농축 ytterbium의 존재비를 Table 2에 나타내었다.

본 연구에서는, 적절한 강도의 방사능을 갖는 선원의 제작을 위해 ^{168}Yb 이 20%까지 농축된 금속산

Table 2 Isotopic abundance of natural and enriched Ytterbium

Stable Isotopes	Abundance, %	
	Natural	Enriched
^{168}Yb	0.135	20.6
^{170}Yb	3.1	10.65
^{171}Yb	14.4	24.65
^{172}Yb	21.9	17.3
^{173}Yb	16.2	8.8
^{174}Yb	31.6	14.0
^{175}Yb	12.6	4.0

화물(Yb_2O_3) 분말을 사용하여 중성자 조사표적을 제작하였다. 점 선원 형태를 유지할 수 있도록 Yb_2O_3 분말을 소형 펠릿으로 가공하기 위한 장치를 개발하였고 압분 및 소결공정변수를 실험을 통하여 최적화하였다. 먼저 분말표적을 직경 1 mm, 높이 1 mm인 실린더형의 압분체로 제작할 수 있는 펠릿 성형기를 제작하였다. Fig. 2에 보인 바와 같은 성형치구를 스테인리스스틸로 만들었고 분말에 압축력을 가하는 부분인 핀과 다이는 초경합금을 사용하여 제작하였다. Fig. 2 (b)에 보인 치구를 Fig. 2 (a)의 장치에 올려놓고 원하는 힘으로 압력을 가할 수 있도록 제작하였다.

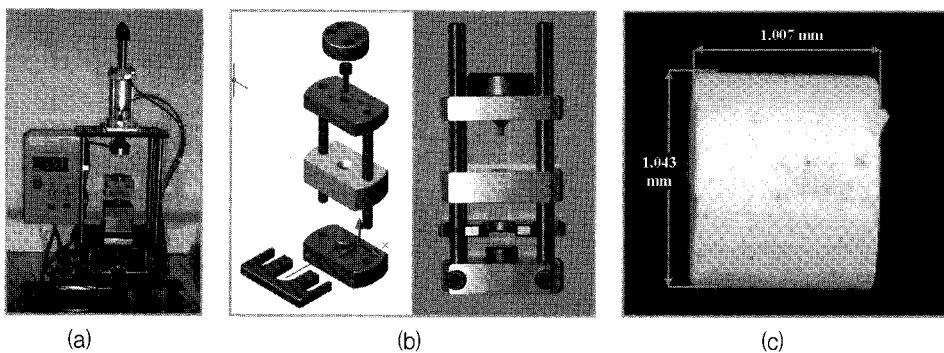


Fig. 2 Photograph of pellet compacting equipment for Yb_2O_3 powder; (a) pressing equipment, (b) compacting jig, (c) fabricated Yb_2O_3 pellet

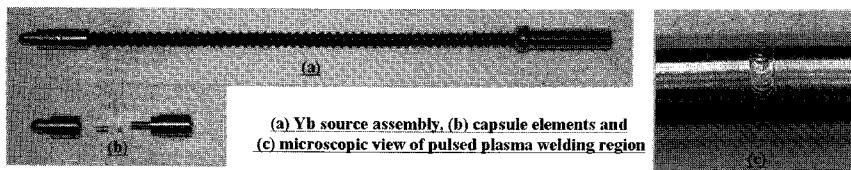


Fig. 3 Photographies of ^{169}Yb source assembly and its components

3.2. 선원 어셈블리의 설계 및 제작

^{169}Yb 선원은 평균에너지가 200 keV로 ^{192}Ir 의 400 keV에 절반에 불과하고 방사능 또한 ^{192}Ir 선원의 10% 정도이다[9]. 따라서 ^{192}Ir 선원에 비해 작은 차폐체로도 작업자의 방사선 안전을 도모할 수 있어 현재 시중에서 사용되는 ^{192}Ir 선원보다 현저하게 가볍게 조사기를 제작할 수 있다. 그러나 국내 비파괴검사 업체에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 조사기에 적용이 가능할 경우 추가적인 전용조사기를 개발하지 않아도 곧바로 현장적용이 가능한 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 비파괴검사 현장에서 사용되고 있는 ^{192}Ir 조사기를 이용할 수 있도록 ^{169}Yb 선원의 어셈블리를 설계·제작 하였다. (Fig. 3)

4. 결과 및 고찰

하나로의 여러 조사공에서 표적물질을 중성자조사 할 때에 대한 방사능생성수율을 식 (6)을 이용하여 계산하였고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 계산결과 하나로에서 가장 높은 방사능을 효과적으로 생성하기 위해서는 중성자속이 높은 CT나 IR조사공에서 약 7~8일 정도 중성자 조사하는 것이 바람직할 것으로 평가되었으나 하나로의 특성상 CT 및 IR 조사공은 운전 중 조사물질의 원자로 입인출이 불가능하기 때문에 이 조건의 중성자 조사를 할 수 없다. 따라서 하나로의 운전주기인 23일을 기준으로 OR3 조사공을 사용할 경우 가장 방사능이 높은

선원을 얻을 수 있다. 실제 방사능생성량은 중성자 자기흡수효과에 의해서 식 (6)에 의해 예측된 값에 비하여 작은 값을 갖는다. 중성자자기흡수효과를 고려한 식 (7)을 사용하여 평가한 결과 표적물질인 Yb_2O_3 펠릿의 중성자자기흡수인자는 0.68이다.

천연 Yb_2O_3 분말을 사용하여 다양한 성형 및 소결 조건하의 실험 통해 적절한 강도를 갖는 성형 및 소결조건을 도출하였다. 성형압력이 압분체의 밀도에 미치는 영향을 고려하기 위하여 40 ~ 100 kgf 영역에서 펠릿을 성형하여 1000°C, 5 hr 동안 소결한 전·후 소결체의 밀도를 측정하였다. Fig. 5 (a)에 나타난 바와 같이 성형압력이 증가 할수록 소결체 및 압분체의 밀도가 증가함을 알 수 있었다. 성형압력이 100 kgf를 초과할 경우 압분체 및 소결체의 밀도가 더욱 증가하는 것을 예상할 수 있으나 이 경우 초경합금으로 제작된 가압핀의 기계적 허용강도를 넘어서게 되어 소성변형이 발생하므로

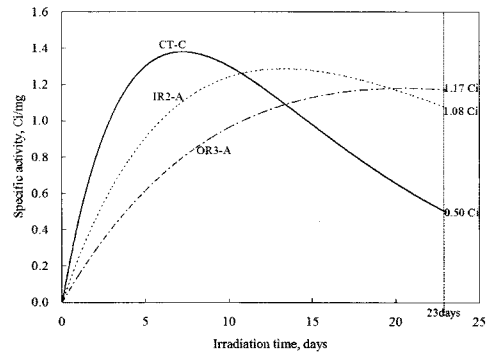


Fig. 4 Specific activity of ^{169}Yb in accordance with irradiation time and thermal neutron flux

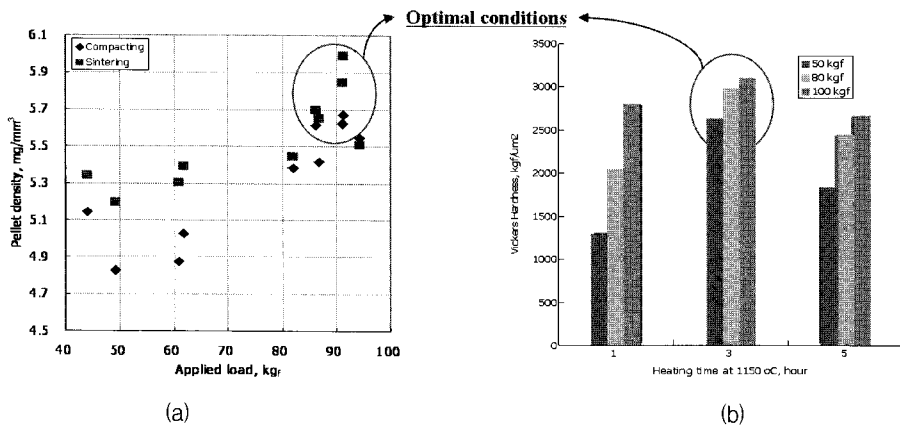


Fig. 5 (a) Pellet density according to applied forces, (b) Micro-Vickers hardness in accordance with heating temperature

100 kgf 이상의 하중에서는 성형이 불가능하였다. 그러나 소결체가 6.0 mg/mm³ 정도의 밀도를 가질 경우 중성자 조사 후 적절한 비방사능 강도를 가질 것으로 예상되기 때문에 100 kgf 정도의 가압력으로도 충분한 밀도의 소결체를 만들 수 있었다.

펠릿 성형 및 소결에 있어 가장 적합한 성형압력과 소결조건을 결정하기 위하여 여러 조건으로 펠릿을 성형·소결한 후 소결체의 Micro-Vickers 경도를 측정하였다. 성형 및 소결 조건은 Table 3에 보인바와 같이 모두 27 가지 조건으로 제작하였다. Micro-Vickers 경도측정 조건은 1 kgf의 가압력과 20초의 가압시간으로 하였다. Fig. 5 (b)에 보인바와 같이 100 kgf, 1150°C, 3 hr의 조건에서 가장 우수한 경도의 소결체를 얻을 수 있었다.

이렇게 제작된 Yb₂O₃ 소결체를 Fig. 6 (a)와 같은 표적캡슐에 삽입하고 Fig. 6 (b)에 나타난 표적캡슐 마개를 캡슐에 끼워 넣고 밀봉용접을 실시하여 중성자 조사용 표적을 제작한다. 표적캡슐은 열중성자와의 반응성 등을 고려하여 순수 알루미늄(A1050)재질을 사용하였고 밀봉은 Nd:YAG 펄스 레이저 용접을 적용하였다. 용접조건은 Table 4에

보인바와 같이 용접된 후 표적의 용접부와 용접부 단면은 Fig. 6에 나타내었다. 표적캡슐의 용접부 단면검사결과, 캡과 캡슐의 접합부에 노치효과를 유발할 수 있는 작은 구멍이 나타났으나 캡슐의 재질이 연성이 매우 좋은 순수 알루미늄 계열이기 때문에 구멍주변으로 노치나 균열의 성장이 어려울 것으로 판단된다.

Table 3 Conditions of compacting and sintering for Yb₂O₃ target

Compacting Force	Sintering temperature	Sintering time
50 kgf	900 °C	1 hr
80 kgf	1000 °C	3 hr
100 kgf	1150 °C	5 hr

Table 4 Nd-YAG welding conditions for sealing the aluminum capsule

Speed mm/min	Input volt.	Frequency	Pulse width	Shielding
80	200 V	20 Hz	2 msec	15 l/min, Ar

Pulsed Nd-YAG laser welding, Specimen rotating 450°

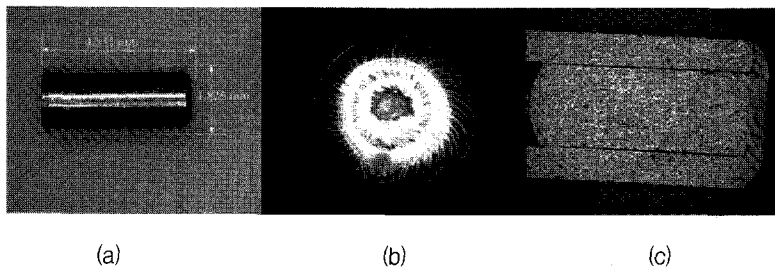


Fig. 6 Photographs of welded aluminium inner capsule; (a) overview of welded capsule, (b) weld bead shape, (c) cross-section of capsule

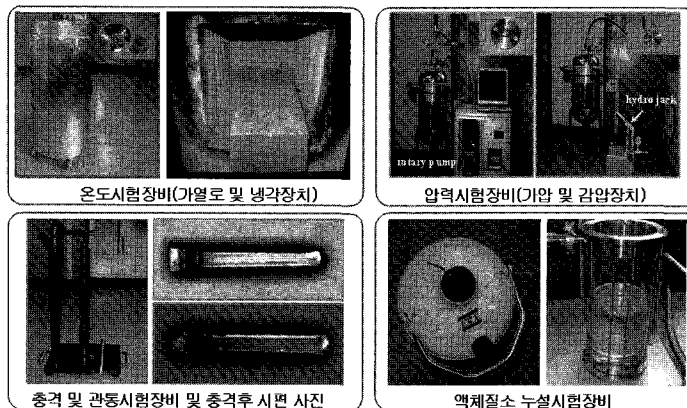


Fig. 7 Photographies of safety test equipment

밀봉선원은 방사성물질을 견고하게 격납하고 있는 선원이므로 선원 캡슐의 안전성이 무엇보다도 중요하다. 따라서 과기부고시 및 ISO 규정에 따른 안전기준을 만족해야 한다. ^{169}Yb 비파괴검사용 밀봉선원은 ISO2919 및 과기부고시 2004-20호의 시험기준인 C43515 등급을 만족해야 한다. 본 연구에서는 이 기준에 의거한 온도, 외부압력, 충격, 관통 시험을 한 후 누설여부 시험을 수행하여 선원 캡슐의 기계적 건전성을 평가하였다. 평가결과 C43515에 의한 시험기준을 만족함을 확인하였다[10].(Fig. 7)

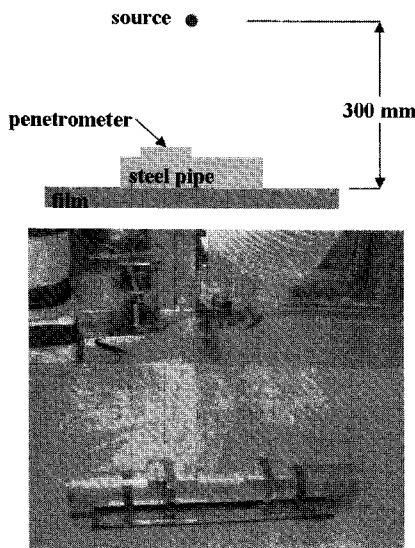


Fig. 8 Schematic drawing and photography of NDT set up of welded steel tube

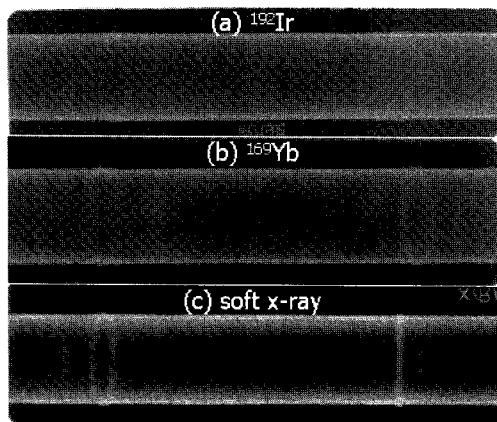


Fig. 9 Photographies of radiography films for, (a) ^{192}Ir source, (b) ^{169}Yb source and (c) soft x-ray

동일한 강관 용접부에 대하여 ^{192}Ir 및 soft X-ray 와 개발된 ^{169}Yb 선원을 이용한 비파괴검사를 실시하였다. 외부표면에 두 줄의 원주 용접부가 있는 두께 4 mm의 STS304 강관을 대상 피사체로 선정하였다. Gas tungsten arc welding (GTAW)를 이용하여 용가재 없이 비드만 생성 하였다. Fig. 8에 보인바와 같이 선원과 필름간의 거리는 300 mm로 배치하였다. Agfa-Gev D7 필름을 사용하였고 노출 시간은 각각 방사능 강도에 따라 ^{192}Ir 가 1.7분, ^{169}Yb 가 36분 그리고 X-ray는 20초로 하였다. 정량적인 평가를 위하여 투과도계를 강관위에 설치하였으며 현상조건은 20°C 에서 자동현상을 하였다.

제작된 선원을 이용한 비파괴시험실시에 대한 필름 상질을 평가한 결과 soft X-ray로 촬영한 필름에서는 5개, ^{169}Yb 는 4개, ^{192}Ir 는 2개의 투과도계선을 확인할 수 있었다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 ^{169}Yb 선원이 4 mm 이하 탄소강의 비파괴검사에 매우 유용함을 확인하였다.

5. 결론

하나로 및 동위원소생산시설을 이용하여 ^{169}Yb 비파괴검사용선원 생산기술을 개발하였다. 분말표적을 소형 펄릿으로 성형하기 위한 장치 및 기술을 개발하였고 소결체를 얻기 위한 소결조건을 도출하였다. 중성자 조사시험 및 감마선자기흡수효과를 고려하여 방사능생성량을 평가한 결과 하나로를 활용하여 약 5.0 Ci의 선원 제조가 가능함을 확인하였다. 또한 4 mm 두께의 강관 용접부에 대하여 ^{192}Ir 선원 및 X-ray에 대해 비파괴검사 비교평가를 실시한 결과 ^{192}Ir 에 비하여 상질이 우수함을 확인하였다. 개발된 선원은 고분해능의 영상이 요구되는 전자산업분야, 우수한 상질을 요구하는 원자력 발전산업분야, 기타 발전 및 항공분야 등에 적용하면 보다 신뢰도 높은 방사선투과검사가 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] M. Dobrowolski and A. Jedrzejewski, "Radiographic testing of welds on small diameter pipes using ytterbium-169," British J. of NDT, Vol. 17, No. 1, pp. 15-20, (1975)

- [2] Derek Pullen and Peter Hayward, "Gamma radiography of welds in small diameter steel pipes using enriched ytterbium-169 sources," *British J. of NDT*, Vol. 21, No. 7, pp. 179-184, (1979)
- [3] A. Jedrzejewski, M. Dobrowolski and J. Swoboda, "Method of radiographic testing of tube-to-tube-plate welds for nuclear power plants," *Przegł Elektrotech*, Vol. 55, No. 1, pp. 37-39 (1979)
- [4] E. Brown, R. B. Firestone and V. S. Shirley, *Table of Radioactive Isotopes*, John Wiley & Sons, New York (1986)
- [5] C. M. Laderer J. M. Hollander and I. Perlman, *Table of Isotopes*, Sixth Edition, John Wiley & Sons, New York (1976)
- [6] J. Gilat and Y. Gurfinkel, "Self-shielding in activation analysis," *Nucleonics*, Vol. 21, No. 8, 143 (1963)
- [7] W. K. Cho, "Development of Ir-192 brachytherapy sources for medical uses," KAERI report (1996)
- [8] 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, "Development of ^{192}Ir small-focal source for non-destructive testing application by using enriched target material," *J. of Korean Soc. for NDT*, Vol. 27, No. 1 (2007)
- [9] Hisamichi Yamabayashi, "Development of production techniques for Yb-169 sources," *Radioisotopes*, Vol. 43, No. 5, pp. 296-308 (1994)
- [10] D. H. Kim, K. S. Seo, K. S. Bang, J. C. Lee and K. J. Son, "Development and application of test apparatus for classification of sealed source," *Korean J. of Radiation Protection*, Vol. 32, No. 1, pp. 35-43 (2007)