

# 밀봉선원의 성능시험을 위한 장치 개발 및 적용

김동학, 서기석, 방경식, 이주찬, 손광재  
한국원자력연구소

2006년 11월 19일 접수 / 2007년 2월 20일 채택

밀봉선원은 과학기술부고시에 의거하여 사용용도별로 등급에 따라 해당 성능시험을 수행하고, 각 성능시험을 거친 후 해당 방사성핵종의 방사능 누설량이 200벵크렐을 초과하지 아니하여야 한다. 이러한 성능시험은 온도시험, 외부압력시험, 충격시험, 진동시험 및 관통시험으로 구성되어 있으며 등급에 따라서 각 성능시험의 조건이 각각 다르다. 본 연구에서는 진동시험을 제외한 성능시험을 위한 장치를 개발하고 이를 세 가지 종류의 밀봉선원의 성능시험에 적용하였다. 의료용 근접치료기에 사용되는 근접치료기용 선원은 5등급의 온도시험, 3등급의 외압시험, 2등급의 충격시험을 수행하여 'C53211' 등급의 기준에 적합함을 보였다. 산업용 조사기에 사용되는  $^{75}\text{Se}$  및  $^{160}\text{Yb}$  선원에 대하여 4등급의 온도시험, 3등급의 외압시험, 5등급의 충격시험과 관통시험을 실시하여 'C43515' 등급의 기준에 적합함을 입증하였다.

중심어 : 밀봉선원, 성능시험, 시험장치, 근접치료용 밀봉선원, 산업용 조사기용 밀봉선원

## 1. 서론

의료분야, 산업분야, 농학분야 등에서 널리 사용되고 있는 방사성동위원소는 기술의 발전 등으로 수요량의 증가와 함께 이를 안전하고 효율적으로 운반하기 위하여 운반캡슐의 다양화가 요구되고 있다. 밀봉선원은 산업체에서 비파괴시험 및 계측 등을 위한 선원은 물론이고 치료를 목적으로 하는 선원으로 다양한 분야에서 사용되고 있다. 이러한 밀봉선원은 특수형 운반용기로서 과학기술부고시 2001-23호(방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정) 및 IAEA 기술기준에 따른 시험을 통해 건전성을 입증 받아야 한다[1,2]. 이와는 별도로 밀봉선원의 생산을 위한 과학기술부고시 2004-20호(방사성동위원소등의 생산에 관한 기준)에 따라서 밀봉선원의 용도에 따른 등급에 적합한 성능시험을 통하여 안전성이 입증되어야 한다.[3] 이러한 과학기술부고시 2004-20호에서 규정하고 있는 기술기준은 ISO 2919[4]에서 제시하고 있는 기준과 유사하다.

밀봉선원의 성능시험을 위한 시험에는 일정한 온도를 유지하는 온도시험과 일정한 압력으로 가압하거나 감압하는 압력시험이 있다. 또한 시험에 각 등급에 적합한 봉이나 핀을 자유낙하 하는 충격시험 및 관통시험이 있으며 각 등급에 적합한 주파수와 진폭 또는 가속도를 가지고 시험을 수행하는 진동시험이 있다. 과학기술부고시 2004-20호에서는 시험을 거친 후 해당 방사성핵종의 방사능 누설량이 200 벵크렐을 초

과하지 않는지를 확인하여야 한다고 규정하고 있으며 ISO 2919에서는 ISO 9978[5]에서 기술하고 있는 누설시험을 통과하여야 한다고 규정하고 있다. 이러한 두 가지 평가 방법은 동일하며 방사능 누설량을 평가하기 위하여 누설시험을 실시한다 [5].

본 연구에서는 밀봉선원의 등급에 따른 성능시험에 대한 장치를 개발하고 이를 이용하여 3가지 종류의 선원에 대하여 시험을 수행하였다. 성능시험 중에서 진동시험은 밀봉선원이 많이 사용되고 있는 의료용 라디오그래피 및 근접치료기와 산업용 라디오그래피 등에는 등급에 따른 시험을 수행하지 않고, 진동시험을 수행하기 위해서는 고가의 진동장비가 요구되며 각 밀봉선원에 따른 지그를 제작하여야 한다. 이에 진동시험을 위한 장치를 제외하고 온도시험, 압력시험, 충격시험 및 관통시험을 위한 장치를 개발하였다. 이러한 시험 장치를 이용하여 하나의 의료용 근접치료기용 밀봉선원과 두개의 산업용조사기에 사용되는 밀봉선원에 대한 성능시험을 수행하였다.

## 2. 밀봉선원의 성능시험 절차 및 장치

Table 1과 같이 용도에 따라서 적절한 밀봉선원의 등급에 대한 성능시험을 수행하도록 과학기술부 고시 2004-20호는 규정하고 있다. 이러한 규정에 의하여 등급에 따른 Table 2와 같은 시험 조건에 대하여 성능시험을 수행하여야 한다. 이러한 성능시험의 용도별 등급과 시험 조건은 ISO 2919에서 규정하고 있는 등급분류를 위한 시험과 유사하다. 과학기술부 고시에서는 충격시험의 2등급에서 밀봉선원을 1.5 m에서 10

책임저자 : 김동학, dhkim@kaeri.re.kr, 한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150번지 한국원자력연구소 사용후핵연료기술개발부

회 자유낙하 시키는 조건이 추가로 요구하고 있다. ISO 2919 시험에서는 굽힘시험을 추가로 수행하는 조건이 있다. 본 연구에서는 이러한 과학기술부 고시 2004-20호 및 ISO 2919 시험을 모두 수행할 수 있도록 시험 장치를 개발하였다.

**2.1 온도시험**

온도시험은 저온시험과 고온시험으로 나누어진다. 저온 시험은 -40℃에서 20분간 유지하는 시험으로 45분 이내에 시험온도로 냉각시켜야 한다. 고온시험은 Table 2에서 나타난 각 등급에 적합한 온도에서 1시간 이상 유지하는 시험이다. 상온에서 시험온도로 온도를 상승시킬 경우에 Table 3에서 나타난 최대 제한 시간 이내에 각 등급에 따른 시험온도에 도달되어야 한다. 2~3등급의 시험선원은 노냉이나 시험환경에서 서서히 주위온도로 냉각시키지만 4~6 등급의 시험 선원은 15초 이내에 최대 온도 20℃의 물로 옮기는 열 충격시험을 하여야 한다. 열충격을 위한 물은 선원체적의 10배 이상의 흐르

는 물이나 20배 이상의 정지상태의 물을 이용한다. 시험을 위한 시험영역체적은 시편체적의 5배 이상이어야 하며 고온시험을 위해서 가스나 기름을 사용한 로를 이용할 경우에 산화 환경이 시험동안 유지되어야 한다. 시험은 공기 중에서 이루어져야 하지만 저온시험일 경우에 냉각을 위해 드라이 아이스나 같은 이산화탄소 분위기에서 이루어질 수도 있다.

Fig. 1은 저온시험을 위한 챔버이다. 저온시험을 위한 챔버의 크기는 직경이 318.5 mm이며 높이가 606 mm이다. 챔버 구조물은 3 mm 두께의 스테인레스강(STS 304)를 이중 셸 구조로 만들었으며 이중 셸 내부에 25.5 mm의 스티로폼을 삽입하여 단열재로 사용하였다. 온도측정을 위한 K-type의 열전대를 사용하여 NI사의 SCXI-1001, NI TC-2095, Labview를 사용한 데이터 취득 장비를 사용하여 시험 온도를 측정하였다.

고온시험은 Fig. 2와 같은 12 kW 용량의 전기로를 이용한다. 이 전기로는 200X350X200 mm의 체적을 가지며 최대

**Table 1.** Sealed source classification (performance) requirements for typical usage

Sealed source usage		Sealed source class, depending on test				
		Temperature	Pressure	Impact	Vibration	Puncture
Radiography-Industrial	Sealed source	4	3	5	1	5
	Source to be used in device	4	3	3	1	3
Medical	Radiography	3	2	3	1	2
	Gamma teletherapy	5	3	5	2	4
	Brachytherapy	5	3	2	1	1
	Surface applicators	4	3	3	1	2
Gamma gauges (medium and high energy)	Unprotected source	4	3	3	3	3
	Source in device	4	3	2	3	2
Beta gauges and sources for low-energy gamma gauges or X-ray fluorescence analysis		3	3	2	2	2
Oil-well logging		5	6	5	2	2
Portable moisture and density gauge		4	3	3	3	3
General neutron source application		4	3	3	2	3
Calibration source activity > 1 MBq		20	2	2	1	2
Gamma irradiation sources	Category I	4	3	3	2	3
	Category II, III, IV	5	3	4	2	4
Ion generators	Chromatography	3	2	2	1	1
	Static eliminators	2	2	2	2	2
	Smoke directors	3	2	2	2	2

**Table 2.** Classification of sealed source performance

Test	Class						
	1	2	3	4	5	6	X
Temperature	No test	-40°C(20min.)+ 80°C(1 h)	-40°C(20min.)+ 180°C(1 h)	-40°C(20min.)+ 400°C (1 h) and thermal shock to 29°C	-40°C(20min.)+ 600°C (1 h) and thermal shock to 29°C	-40°C(20min.)+ 800°C (1 h) and thermal shock to 29°C	Special test
External Pressure		25 kPa absolute	25 kPa absolute to 2 MPa absolute	25 kPa absolute to 7 MPa absolute	25 kPa absolute to 70 MPa absolute	25 kPa absolute to 700 MPa absolute	
Impact		50g from 1m or equivalent imparted energy and 10 times free drop on a steel pad with 1.5 m height	200g from 1m or equivalent imparted energy	2kg from 1m or equivalent imparted energy	5kg from 1m or equivalent imparted energy	20kg from 1m or equivalent imparted energy	
Vibration		3 times 10 min 25~500 Hz at 49 m/s <sup>2</sup>	3 times 10 min 25~50 Hz at 49 m/s <sup>2</sup> and 50~90 Hz at 0.635 mm amplitude peak to peak and 90~500 Hz at 90 m/s <sup>2</sup>	3 times 30 min 25~80 Hz 1.5 mm amplitude peak to peak and 80~2,000 Hz at 196 m/s <sup>2</sup>	Not used	Not used	
Puncture		1g from 1m or equivalent imparted energy	10g from 1m or equivalent imparted energy	50g from 1m or equivalent imparted energy	300g from 1m or equivalent imparted energy	1kg from 1m or equivalent imparted energy	

1200°C까지 온도를 올릴 수 있다. 4~6 등급에 대한 고온시험을 위한 열충격은 비이커에 담겨져 있는 물을 이용하였다. 이때 온도의 측정은 저온시험에서와 동일한 방식을 이용한다.

**Table 3.** Temperature-time relationship for tests at temperatures above ambient

Temperature °C	Maximum time limit min
80	5
180	10
400	25
600	40
800	70

1) Part of this test for class 6 is similar in principle to the test given by IAEA.

## 2.2 외부압력시험

외부압력시험은 25 kN/m<sup>2</sup>의 절대압에서 5분간 시험선원을 노출시키는 감압시험과 각 등급에 적합한 압력을 5분간 유지하는 가압시험으로 나누어진다. 각 시험은 2회 실시하며 시험사이에는 압력을 대기압으로 환원시킨다. 감압시험을 위한 진공계이지는 20 kPa의 절대압 이하의 압력을 읽을 수 있어야 하며 가압시험을 위한 압력계이지는 등급에 적합한 압력에 대하여 10%이상 큰 압력까지 읽을 수 있어야 한다. 이러한 계이지는 교정이 완료되어야 한다. 감압시험은 공기 중에서 수행한다. 가압시험은 밀봉선원에 접촉하는 매체로 물을 사용하여야 하며 유압은 시험 중에 밀봉선원에 발생할 수 있는 작은 누설을 막을 수 있기 때문에 사용하지 않아야 한다.

감압시험 및 가압시험은 동일한 압력 탱크를 사용하였다. 압력탱크는 318 mm의 직경과 560 mm의 높이를 가진 52 mm 두께의 스테인레스강(STS 304)을 사용하여 제작되었다. 챔버는 감압과 가압에 따라 포트부분을 바꾸어서 사용한다.

감압시험에서는 로터리 방식의 진공펌프를 이용하여 가압을 위해서는 수압 잭을 이용한다. Fig. 3은 이러한 진공펌프와 수압 잭을 연결한 외압시험 장치를 보여준다.

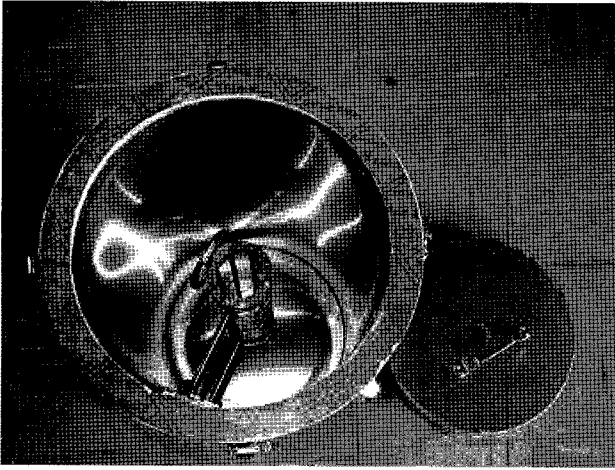


Fig. 1. Chamber of low temperature test

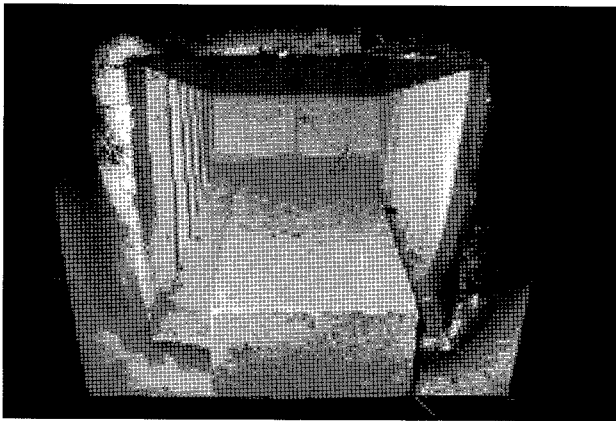
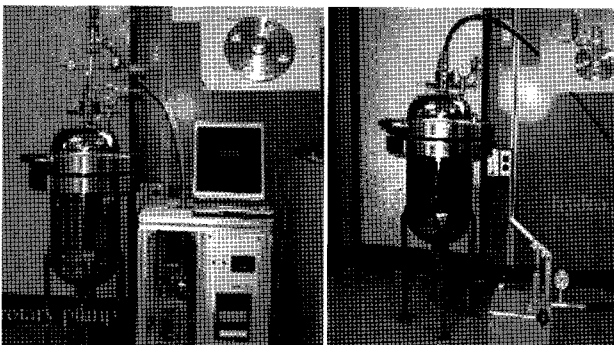


Fig. 2. Test section of electric furnace for high temperature test.



(a) low pressure test

(b) high pressure test

Fig. 3. The pressure test apparatus.

### 2.3 충격시험 및 관통시험

충격시험은 해당등급에 적합한 질량의 해머를 이용하여 해머 질량의 10배 이상의 철재 모루 위에 위치한 선원에 최대한 손상을 받도록 1 m 높이에서 자유낙하 시킨다. 또한 관통 시험은 해당등급에 따라 적합한 질량이며 바늘이 견고하게 부착되어 있는 해머를 해머 질량의 10배 이상의 철재 모루 위에 위치한 선원에 최대한 손상을 받도록 1 m 높이에서 자유 낙하 시킨다.

충격시험과 관통시험은 평단 면을 가진 해머나 핀이 부착된 해머를 모루위에 위치한 밀봉선원에 자유낙하 시킨다. 해머를 자유낙하시키기 위하여 공압을 이용한 투하장치가 있는 기둥을 Fig. 4와 같이 모루 위에 설치한 장치를 개발하였다. 충격시험을 위한 해머는 충격면이 평탄하고 직경이 25 mm 이며 평단 면의 모서리부분이 반경 3 mm 정도로 둥글게 가공된 것으로 해머의 무게중심은 충격면을 구성하는 원의 중심축에 있어야 한다. 관통시험을 위한 해머의 바늘은 50~60 Rockwell C경도를 가지며 높이는 6 mm, 직경은 3 mm 의 반구형 하부를 가지며 바늘의 중심선은 무게중심 및 해머에 부착된 지점의 중심에 정렬되어야 한다. Fig. 5와 같이 각 등급에 따른 해머를 제작하였다.

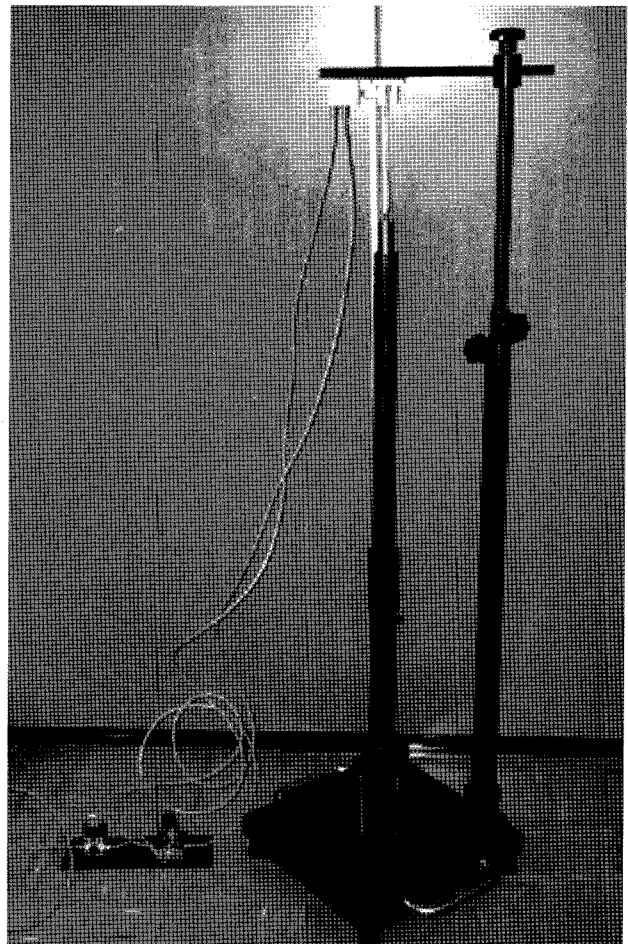


Fig. 4. Drop apparatus for impact, puncture and bending test

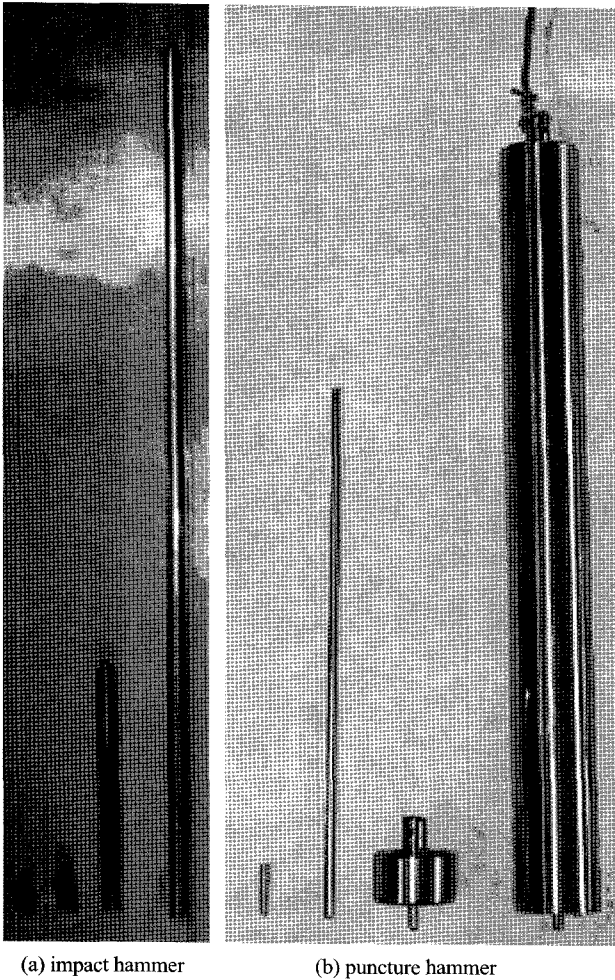


Fig. 5. Hammer for the impact and puncture test

과학기술부 고시 2004-20에서 2등급의 충격시험은 1.5 m의 높이에서 밀봉선원을 철판 위로 10회 자유낙하 시키는 시험을 ISO 2919 시험에서와 다르게 추가로 수행하도록 하였다. 충격시험과 동일한 장치에서 투하장치를 이용하여 밀봉선원을 투하한다.

### 2.4 굽힘시험

ISO 2919 시험에서는 과학기술부 고시 2004-20에서와 달리 굽힘시험을 길이가 최소 직경에 비하여 15배 큰 밀봉선원이나, 길이가 최소 직경에 비하여 10배 크고 길이가 100 mm 이상의 밀봉선원, 30 mm 이상의 근접치료용 밀봉선원에 대하여 수행하도록 규정되어 있다. 30 mm 이상의 근접치료용 밀봉선원은 선원길이의 1/3정도를 돌출시키고 플라이어와 같은 공구를 이용하여 (3.0±0.1) mm의 반경으로 최소 90°의 각도로 구부렸다가 펴는 시험을 수행한다. 별도의 시험 장치가 없이 플라이어와 같이 밀봉선원을 잡을 수 있는 공구만 있으면 수행할 수 있으며 밀봉선원의 굽힘 정도를 확인할 수 있는 3 mm반경의 실린더만 있으면 시험을 수행할 수 있다. 그

러므로 별도의 시험 장치는 개발하지 않았다.

길이가 최소 직경에 비하여 15배 큰 밀봉선원에 적용하는 정적굽힘시험은 Fig. 6과 같이 3점 하중 방식으로 실시한다. 각 실린더는 충분한 길이를 가지며 50~55 룩크웰 강도를 가진 재료로 만들어지며 회전하지 않으며 세 실린더의 축들은 평행하여야 한다. 등급에 따라서 Table 4에서 나타내는 하중을 중앙 실린더에 정적으로 가한다. 유연한 밀봉선원의 경우에는 중앙 실린더의 축이 지지하는 두 실린더의 축이 이루는 면에 도달할 때까지 변형되도록 한다. Fig. 7과 같은 개념을 가진 두 강판 사이에 지지 실린더와 중앙 실린더를 위치시키고 중앙 실린더에 추를 매달아서 정적 하중을 가하는 방식을 사용하며 시험이 가능할 것이다. 정적굽힘시험에서 사용되는 실린더의 직경 및 배치는 선원의 직경에 따라 다르므로 정적굽힘시험을 위해서는 구체적인 시험 대상인 밀봉선원의 제원이 요구된다. 그러므로 정적굽힘시험에 대한 시험 장치는 실제로 제작하지는 않았다.

길이방향으로 밀봉선원의 1/2정도 돌출되도록 단단히 고정된 후 기준면으로부터 1 m 높이에서 강철재질로 하단부의 직경이 25 mm이고 중량이 1.4 kg인 타격면이 평탄하고 가장자리는 반경 (3.0±0.3) mm 로 둥글게 제작된 타격봉을 자유

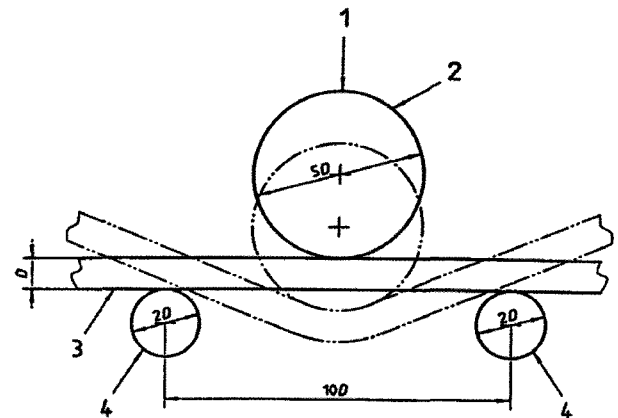


Fig. 6. Schematic diagram of static bending test. D is the diameter of the sealed source.

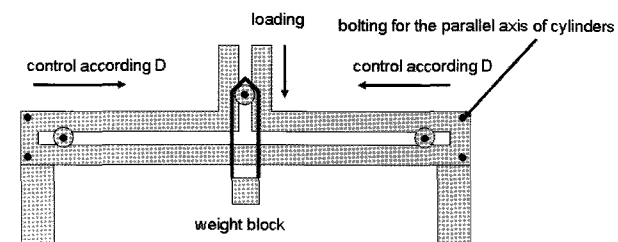


Fig. 7. Schematic diagram for the apparatus of a static bending test

Table 4. Bending test class

Class	Method	Static force
1	No test	
2	Three point bending test for sealed sources with L/D≥15	100 N
3		500 N
4		1,000 N
5		2,000 N
6		4,000 N
7	Bending test for special form radioactive material (L/D≥10)	
8	Bending test for brachytherapy needles (L≥30 mm)	
X	Special Test	

낙하시켜 밀봉선원을 타격시킨다. 타격을 위한 투하장치는 충격 및 관통시험 장치를 이용하여 고정을 위한 지그는 밀봉선원에 따라서 다르므로 실제로 제작하지는 않았다.

2.5 진동시험

진동시험은 선원이 시험하는 동안 견고하게 접촉되도록 진동 장비의 플랫폼에 고착시킨 후, 선원의 각 축에 대하여 시행하며, 최대 3개의 축을 사용하여 실시한다. 또한 각 공명 진동에서 30분간 시험을 계속한다. 제시된 각 조건의 시험주기를 3번 완료하는데 최소진동에서 최대진동까지 모든 범위의 진동을 2등급 및 3등급의 경우 10분 이상, 4등급의 경우 30분 이상에 걸쳐 균일한 비율로 시행한다. 이러한 시험을 위한 진동장비는 고가이며 밀봉선원에 따라서 진동장비의 플랫폼에 고착시키기 위한 지그가 제작되어야 한다. 또한 현재 밀봉선원이 주로 사용되는 의료용이나, 산업용 조사기에 대한 성능시험에서 진동시험을 실시하지 않아도 되므로 진동 시험을 위한 장치의 제작은 실시하지 않았다.

2.6 성능시험의 등급에 대한 표시

이상과 같은 성능시험을 수행한 후에 ISO 2919에서는 이러한 성능시험에 대한 등급을 밀봉선원에 ISO/98/C43515(4,7)와 같은 방식으로 표기한다. 여기서 '98'은 성능시험을 실시한 연도이다. 'C'는 핵종 군별 구분에 따른 방사능준위를 초과하지 않는 경우를 나타내며 방사능 준위를 초과하는 경우에는 'E'로 나타낸다. '43515'는 온도시험, 외부압력시험, 충격시험, 진동시험 및 관통시험에 대한 등급을 차례로 표기한 것이다. 마지막의 '(4,7)'은 굽힘 시험의 등급을 나타내는데 정적굽힘시험과 충격굽힘시험을 모두 수행하는 경우에 표시하며 굽힘시험을 실시하지 않는 경우에는 이를 표기하지 않는다. 과학기술부 고시 2004-20호에서는 마지막의 C43515와 같이 방사선준위의 초과 여부 및 온도, 외부압력, 충격, 진동, 관통시험에 대한 등급만을 표시한다.

3. 밀봉선원 성능시험

본 연구진이 개발한 밀봉선원 성능시험장치는 현재 Table 2에서 음영된 부분에 대한 시험이 가능하다. 온도시험, 관통시험 및 파열시험은 모든 등급에 대한 시험이 가능한 시험장치이다. 압력시험은 3등급까지의 시험이 가능하도록 시험장치를 개발하였다. 고압을 유지하기 위한 챔버는 매우 커진다. 2 MPa의 압력이 유지되는 챔버는 Table 1에서 보여주는 밀봉선원의 용례에 따른 등급에서 유정용 밀봉선원을 제외하고 모든 밀봉선원에 대한 시험에 적용할 수 있으므로 3등급까지 시험이 가능하도록 개발하였다. 진동시험은 고가의 진동장비가 요구되어 장치를 개발하지 않았다. 진동장비를 이용한 진동시험은 향후 수요에 따라서 장비의 구매를 통한 장치를 개발하거나 활용 가능한 진동장비를 이용한 성능시험장치를 개발할 예정이다.

개발된 시험 장치를 이용한 온도시험, 외부압력시험, 충격시험, 및 관통시험에 대하여 절차를 수립하였으며 각 시험에 대하여 KOLAS 인증을 획득하여 시험을 수행하고 있다. 이에 따라서 하나의 의료용 근접치료기용 밀봉선원과 두개의 산업용조사기에 사용되는 밀봉선원에 대한 성능시험을 수행하였다. 모든 시험은 각각 2개의 시편을 사용하여 수행하며 시험 전후에 ISO 99785와 같은 기준에서 규정하는 누설시험을 통하여 방사능 누설량을 평가한다.

3.1 의료용 근접치료기용 밀봉선원

Fig. 8과 같은 의료용 근접치료기용 밀봉선원인 <sup>192</sup>Ir 고선량(High Dose Rate) 밀봉선원에 대하여 시험을 수행하였다. <sup>192</sup>Ir 고선량 밀봉선원은 <sup>192</sup>Ir 370 GBq(10 Ci)의 방사능을 가지고 있는 직경 0.6 mm, 길이 3.5 mm 크기의 선원이 들어가는 직경 1.1 mm, 길이 6 mm 크기의 선원캡슐로 원격조작에 의해 악성종양 등의 환부를 치료하기 위하여 고선량을 근접치료선원으로 사용하기 위한 것이다. <sup>192</sup>Ir HDR 밀봉선원은 근접치료용으로 분류되어 Table 1에서 나타내는 바와 같이 53211의 성능시험 등급에 따라서 시험을 수행하였다. 40℃의 저온시험과 600℃의 고온시험을 수행하는 5등급의 온도시험, 25 kPa의 저압시험과 2 MPa의 고압시험을 수행하는 외압시험 및 50g의 추를 타격하고 1.5 m에서 10회 자유낙하시험을 수행하는 타격시험을 수행하였다. 진동시험과 파열시험은 1등급으로 시험을 수행하지 않았다. 시험에 사용된 시편은 총 6개이며 각 시험별로 2개씩 사용하였으며 시험 전후 누설시험을 거친 후 건전성을 확인하는 것이 가장 중요하다. 이외에 시편의 질량 변화 및 표면에서의 크랙의 발생여부 등을 현미경을 이용하여 분석하였다.

온도 시험의 경우 저온과 고온시험으로 나누어서 시험을 수행한다. 40℃에서 20분 동안저온시험을 수행한 후 600℃에서 1시간 동안 고온시험을 실시한다. 저온 냉각매체로 드라이아이스(CO<sub>2</sub>, -78.6℃)를 이용하였다. Fig. 9는 밀봉선원의 세 단면에서 취득한 온도 곡선을 나타낸다. 시편위치부의 C단면의 온도는 9분경(≈40℃)부터 급격히 온도가 떨어지기 시작해서 2분경과 후 드라이아이스의 승화점(-78.6℃)에 가까운 -70℃의 안정화 상태에 도달하여 시험 종료 전까지 준열적 평형 상태를 유지한다. 저온시험을 거친 후 전기로를 이

용하여 고온시험을 수행하였다. Fig. 10과 같은 온도곡선에 대하여 시험을 수행하였다. 상온에서 시험온도까지 약 27분 후에 도달하여 1시간 동안 600℃를 유지하였다. 이후 전기로에서 밀봉선원을 바로 꺼내어서 비아커에 있는 약 20℃의 온도를 가지고 있는 100 ml의 물에 넣어서 열충격을 가하였다. 현미경을 이용하여 표면을 검토한 결과 색의 변화가 발생하였지만 형상과 같은 변화는 거의 없었다.

절대압 20 kPa의 감압시험을 거친 후 2 MPa의 가압시험을 실시하는 3등급 외부압력시험을 수행하였다. 각각의 시험은 시험압에 5분 동안 노출시킨 후 대기압으로 환원하는 과정을 2회 반복한다. 감압의 경우 로터리방식의 진공펌프를 부착하고 가압의 경우 수압 잭을 연결하여 가압하였다. 외부

압력시험에 따른 시험 압력 값 및 조건은 Table 5와 같다. 가압 시 높은 수압으로 인한 밀봉선원내의 균열로 선원내로 물이 스며들 수 있으므로 실험 전후의 선원의 질량 변화를 고려하였고 외형검사를 수행하였다. 각각의 시험의 실험 전후의 질량의 변화는 거의 없으며 시험의 변화는 없었다.

2 등급의 충격시험은 질량 50 g의 추를 1 m의 높이에서 선원의 가장 취약부에 자유낙하 시켰다. 실험에 사용된 추의 질량은 50.2581 g이다. 실험 후 시험의 길이 및 직경의 변화를 측정하였으며 길이방향의 변화는 없으나 두께(t)와 직경(d)의 다소 차이가 있으나 전체적으로 A시험의 경우 25%, B 시험의 경우 20% 줄거나 늘어남을 알 수 있었다. 충격 시험 후 시험표면에서의 크랙의 발생 및 온도 및 압력시험에서의 외관을 살펴보기 위해서 현미경 분석을 수행하였다. 마이크로 단위의 크랙이 발생하였다. 크랙 발생위치는 선원의 취약부인 용접부위에서 발생하였지만 이는 표면의 흠집이다.

온도, 압력, 충격시험 후 시험의 건전성 여부를 확인하기 위해 ISO 9978[5]에서 규정하고 있는 버블누설시험에서 액체 질소를 이용한 액체질소버블시험(Liquid nitrogen bubble test)을 실시하였다. 각각의 시험을 액체질소 탱크에 5분 동안 냉각시킨 후 메탄을 수조에 2분 동안 넣고 기포 발생여부를 확인한 결과 6개의 시험 모두 기포가 발생하지 않았다. 충격 시험시험의 표면에 크랙이 발생하였지만 결과적으로 건전성에는 아무런 변화가 없음을 확인하였다.

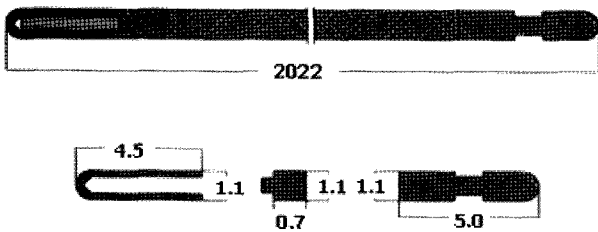


Fig. 8. Ir-192 HDR sealed source for brachytherapy

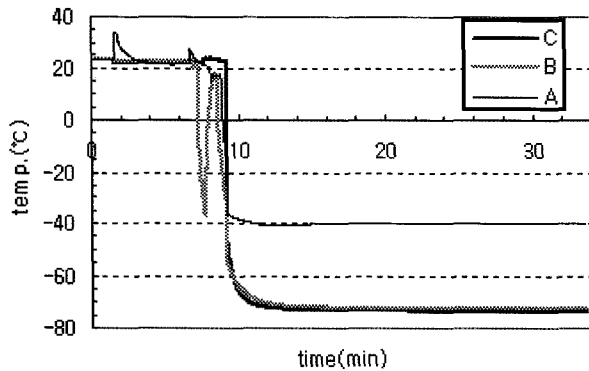


Fig. 9. Temperature distribution at A, B and C position

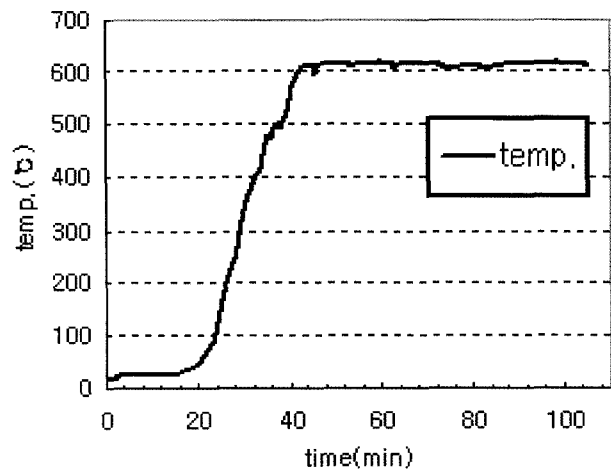
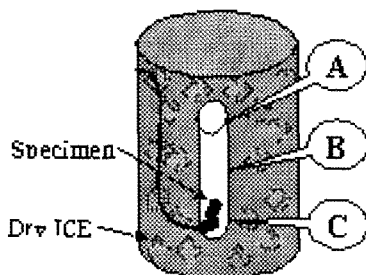
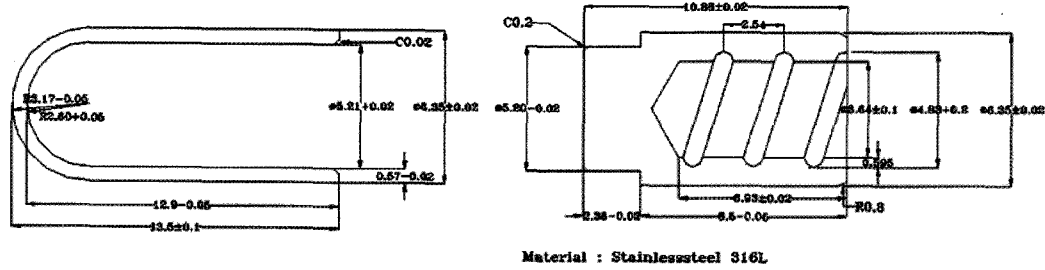


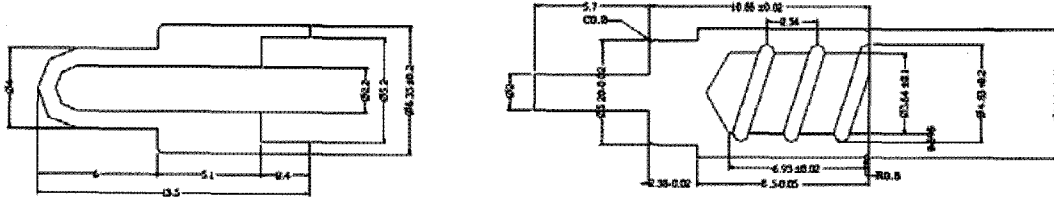
Fig. 10. Temperature of high temperature test for Ir-192 HDR sealed source

### 3.2 산업용조사기용 밀봉선원

Fig. 11과 같은 산업용 조사기에 사용되는 <sup>75</sup>Se 밀봉선원과 <sup>169</sup>Yb 밀봉선원에 대하여 Table 1에서 나타내는 바와 같이 43515의 성능시험을 수행하였다. 즉, -40℃의 저온시험과 400℃의 고온시험을 수행하고, 25 kPa의 절대압에 대한 감압 시험과 2 MPa의 가압시험을 수행하였으며, 5 kg과 300 g의



(a) selenium-75



(b) Ytterbium-169

Fig. 11. The gamma radiography sealed source.

Table 5. Pressure and duration time for the pressure tests of Ir-192 HDR sealed source

	Atmospheric	Pressure	Atmospheric	Pressure	Atmospheric
Depressurization test	100.50 kPa	19.06kPa (5'10")	100.50 kPa	18.1kPa (5'3")	100.48 kPa
Pressurization test	100.47 kPa	2.16 MPa (5'4")	100.47 kPa	2.16 MPa (5'8")	100.47 kPa

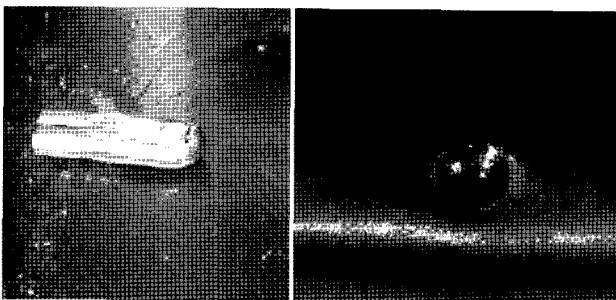


Fig. 12. Deformations due to an impact and a puncture test of a Se-75 gamma radiography sealed source.

해머를 이용한 충격시험과 관통시험을 수행하였다. 진동시험은 1등급으로 수행하지 않았다.

온도 시험의 경우 저온과 고온시험으로 나누어서 시험을 수행한다. -40℃에서 20분 동안저온시험을 수행하고 400℃에서 1시간 동안 고온시험을 실시한다. 밀봉선원을 -40℃이하에서 20분 동안 유지시키기 위하여 액체 질소를 이용하였다. 선원의 체적의 5배 이상인 액체질소 용기에 열전대와 동시에 밀봉선원을 21분간 집어 넣고 온도를 측정하였다. 초기 온도는 -60℃이며 최종온도는 -150℃이다. 고온시험은 가열로를 이용하여 수행하였다. -1℃의 초기온도에서 5분에 기준온도



인 403°C에 도달하였으며 61분간 유지하였다. 이 후에 비이커에 있는 약 20°C의 물에 5초 이내에 넣어서 열충격을 가하였다.

절대압 25 kPa의 감압시험을 거친 후 2 MPa의 가압시험을 실시한다. 각각의 시험은 시험압에 5분 동안 노출시킨 후 대기압으로 환원하는 과정을 2회 반복한다. 로터리 펌프를 이용하여 25 kPa까지 감압하여 6분간 유지하였다가 대기압으로 환원하는 감압시험을 2회 실시하였다. 수압 잭을 이용하여 2.2 MPa로 감압하여 6.25분과 5.25분간 유지하였다가 대기압으로 환원하는 가압시험을 2회 실시하였다.

외경과 하단 가장자리부는 각각 25.4 mm, 3.0±0.3 mm이며 질량 5 kg의 해머를 각각 두개의 선원에 대하여 자유낙하시켰다. <sup>75</sup>Se 밀봉선원의 경우, 1.01 m와 1.04 m의 높이에서 단단히 고정된 철판 위에 위치한 선원에 낙하시켰다. 선원의 직경이 6.32 mm에서 4.01 mm로, 6.33 mm에서 4.27 mm로 감소하고 길이가 21.91 mm에서 22.30 mm로, 21.94 mm에서 22.44 mm로 증가하였다. 또한 <sup>166</sup>Yb 밀봉선원의 경우, 1.01 m와 1.04 m의 높이에서 단단히 고정된 철판 위에 위치한 선원에 낙하시켰다. 선원의 직경이 6.34 mm에서 5.19 mm로, 6.33 mm에서 5.27 mm로 감소하고 길이가 21.93 mm에서 22.14 mm로, 21.91 mm에서 22.16 mm로 증가하였다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 심하게 변형이 발생되었지만 육안에 의한 균열은 보이지 않았다.

높이는 6 mm, 직경은 3 mm의 반구형 하부를 가진 바늘이 있는 질량 300.19 g의 해머를 <sup>75</sup>Se 밀봉선원의 경우에는 1.03 m와 1.04 m의 높이에서, <sup>166</sup>Yb 밀봉선원의 경우에는 1.03 m와 1.02 m의 높이에서 단단히 고정된 철판 위에 위치한 선원에 낙하시켰다. 두 개의 선원에 대하여 수행하였다. 선원의 직경이나 길이의 변화는 거의 없었지만 Fig. 12에서 보는 바와 같이 충격력을 받은 부분에 흠이 발생하였지만 육안에 의한 균열은 보이지 않았다.

온도, 압력, 충격 및 관통시험 후 시편의 건전성 여부를 확인하기 위해 ISO 9978에 따른 누설시험을 실시하였다. 시편을 에틸렌 글리콜(Ethylene Glycol)이 들어있는 진공 챔버에 넣고 챔버내의 압력을 15~25 kPa 정도 감소시킨 후 적어

도 1 분 이상동안 그 상태로 유지하면서 공기방울이 발생하는지를 확인하였다. 이 때 진공 챔버에 있는 에틸렌 글리콜(Ethylene Glycol)에 있는 공기를 줄이기 위하여 1분 이상을 진공상태에 도달하도록 한 후에 누설시험을 실시하였다.

#### 4. 결론

과학기술부 고시 2004-20호 및 ISO 2919에 의한 밀봉선원의 사용용도에 따른 등급에 적합한 성능시험을 위한 시험장치를 개발하였다. 이러한 성능시험에 대하여 KOLAS 인증을 얻어서 시험을 수행하였다. 이러한 등급에 따른 성능시험을 의료용 근접치료기에 사용되는 근접치료기용 밀봉선원 및 산업용 조사기에 사용되는 <sup>75</sup>Se 및 <sup>166</sup>Yb 밀봉선원에 대하여 적용하였다. 의료용 근접치료기용 밀봉선원은 5등급의 온도시험, 3등급의 외압시험, 2등급의 충격시험을 수행하고 진동시험 및 관통시험은 1등급으로 시험을 실시하지 않는다. 이러한 등급에 대하여 성능시험을 수행하고 액체 질소를 이용한 누설시험을 수행하여 등급에 적합함을 판정하였다. 산업용 조사기에 사용되는 밀봉선원은 4등급의 온도시험, 3등급의 외압시험, 5등급의 충격시험과 관통시험을 실시하며 진동시험은 1등급으로 시험을 수행하지 않는다. 이러한 네가지의 성능시험을 수행한 후에 진공버블방식의 누설시험을 수행하여 등급에 적합함을 입증하였다.

#### 참고문헌

1. KOREA MOST Notice. 2001-23, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, 2001.
2. IAEA Safety Standard Series No. TS-R-1, Regulations for Packaging and Transportation of Radioactive Material, 2005 Ed.
3. KOREA MOST Notice. 2004-20, Standards for Production of Radioisotopes, 2004.
4. ISO 2919:1999(E), Radiation protection - Sealed radioactive sources - General requirements and classification, 1999.
5. ISO 9978:1992(E), Radiation protection - Sealed radioactive sources - Leakage Test Methods, 1992.

## Development and Application of Test Apparatus for Classification of Sealed Source

Dong-Hak Kim, Ki-Seog Seo, Kyoung-Sik Bang, Ju-Chan Lee and Kwang-Je Son  
Korea Atomic Energy Research Institute

**Abstract** - Sealed sources have to conducted the tests be done according to the classification requirements for their typical usages in accordance with the relevant domestic notice standard and ISO 2919. After each test, the source shall be examined visually for loss of integrity and pass an appropriate leakage test. Tests to class a sealed source are temperature, external pressure, impact, vibration and puncture test. The environmental test conditions for tests with class numbers are arranged in increasing order of severity. In this study, the apparatus of tests, except the vibration test, were developed and applied to three kinds of sealed source. The conditions of the tests to class a sealed source were stated and the difference between the domestic notice standard and ISO 2919 were considered. And apparatus of the tests were made. Using developed apparatus we conducted the tests for <sup>192</sup>Ir brachytherapy sealed source and two kinds of sealed source for industrial radiography. <sup>192</sup>Ir brachytherapy sealed source is classified by temperature class 5, external pressure class 3, impact

class 2 and vibration and puncture class 1. Two kinds of sealed source for industrial radiography are classified by temperature class 4, external pressure class 2, impact and puncture class 5 and vibration class 1. After the tests, Liquid nitrogen bubble test and vacuum bubble test were done to evaluate the safety of the sealed sources.

**Keywords** : Sealed source, Tests for classification, Test apparatus,  $^{192}\text{Ir}$  brachytherapy sealed source, Sealed source for industrial radiography