

2001 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

비파괴검사용 Ir-192 밀봉방사선원의 방사능 누설시험

Leakage Test of Ir-192 Sealed Radiation Sources for Non-Destructive Testing

조운갑, 한현수, 박울재, 홍순복, 장경덕
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

김용재, 김완태
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

박춘득
호진산업기연주식회사
서울특별시 강남구 역삼동 683-31

요 약

방사선투과 비파괴검사에 사용되는 산업용 Ir-192 밀봉방사선원의 밀봉 안전성을 검증하기 위하여 방사능 누설시험을 실시하였다. 이를 위하여 한국원자력연구소의 연구용 원자로 하나로를 이용하여 실제 비파괴검사에 이용되는 정도의 방사능강도를 갖는 3개의 시험용 밀봉 방사선원을 제작하였다. 누설시험은 국내 원자력법규 및 IAEA, ISO등에서 권고한 밀봉방사선원 누설시험기준을 적용하였으며 시험방법은 침출시험법을 사용하였다. 침출법을 이용한 누설시험결과 56.2, 50.5, 51.2 Ci의 방사능을 갖는 3개의 밀봉방사선원의 누설방사능은 각 선원에 대하여 최대 52.12, 9.71, 5.71 Bq 이었다. 이 값은 밀봉방사선원의 누설이 없는 것으로 판정하는 기준 값인 1,850 Bq(50 nCi)보다 현저히 낮은 값으로서 하나로를 이용하여 제조된 비파괴검사용 Ir-192 밀봉방사선원의 밀봉 안전성을 입증할 수 있었다.

Abstract

Leakage tests were performed to verify the leak tightness of Ir-192 sealed

radiation source for industrial non-destructive testing. Three Ir-192 sealed sources having radioactivity more than 50 Ci were made using research reactor HANARO of Korea Atomic Energy Research Institute. Tests were performed according to the leakage test criteria of domestic nuclear regulations and test standards of IAEA and ISO. As a test method, hot liquid immersion test was adopted to evaluate the leak activity of three Ir-192 sealed sources having radioactivity of 56.2, 50.5, 51.2 Ci. Activities detected after immersion test of each sources showed 52.12, 9.71, 5.71 Bq and these values were very low compared to the safety criteria of sealed source leakage, 1,850 Bq(50 nCi). Through this study, it was verified that leak tightness and source capsule integrity of Ir-192 sealed NDT sources produced in HANARO.

I. 서 론

Ir-192는 방사선투과를 이용한 산업용 비파괴검사에 가장 많이 사용되는 방사성 동위원소이다[1]. 비파괴검사용으로 사용하는 Ir-192 방사선원은 관련법규에서 특수형방사성물질로 분류되며 방사선 안전성을 위하여 밀봉선원으로 제작한다. 밀봉방사선원은 방사성물질이 영구적으로 한 개 혹은 여러 개의 캡슐에 밀봉되어 있는 선원으로서 밀봉캡슐은 내부로부터 방사능의 누설이 발생하지 않아야 하며, 표면의 오염이 없어야 하고 내장된 방사성물질에 대하여 물리적, 화학적으로 안정하여야 한다[2-3]. 밀봉방사선원을 제조하는 경우 방사선원을 내장하는 밀봉캡슐의 밀봉성을 입증하는 것이 중요하다. 한국원자력연구소에서는 하나로를 이용하여 비파괴검사용으로 사용되는 Ir-192 밀봉방사선원을 제조하고 국내 관련법규인 과기처고시 제 96-38호 제10조 별지1의 5항[4] 및 IAEA Safety Series No. ST-1 para. 710, 711[5], 그리고 US 10CFR 71.75(d)[6]의 시험항목에 근거하여 침출시험법에 의한 방사능 누설시험을 수행하였다.

II. 비파괴검사용 Ir-192 밀봉선원 누설시험

1. Ir-192 방사선원

Ir-192는 원자로에서 천연 Iridium을 (n, γ)반응시켜 만든다. 천연 Iridium 금속은 37.3 %의 Ir-191과 62.7 %의 Ir-193으로 구성되어 있다. Ir-191(n, γ)Ir-192 반응에 대한 열중성자 포획단면적은 Ir-192m 생성반응의 400 barn과 Ir-192가 직접생기는 반응의 540 barn을 합하여 940 barn 정도이다. Ir-191(n, γ)Ir-192 반응에 의해 생성된 Ir-192도 다시 1000 barn의 높은 단면적을 가지고 열중성자를 흡수하여 Ir-193을 생성한다. Ir-192는 95.3 % 정도가 74.2일의 반감기를 가지고 β^- 붕괴를 통하여

안정동위원소인 Pt-192로 되고 4.7 % 정도의 Ir-192는 전자포획을 통하여 안정동위원소인 Os-192로 된다. 이때 0.672 MeV(46 %)의 최대에너지를 갖는 β^- 선과 0.604, 0.468, 0.308 MeV의 에너지를 갖는 γ 선을 방출한다[7].

Ir-192는 방출되는 γ 선 에너지 특성으로 인해서 약 10 - 50 g/cm² 두께의 재질에 대한 비파괴검사에 가장 적합하다. 이 두께는 철의 경우 약 1.25 - 6.25 cm의 두께에 해당하며 이는 대부분의 비파괴검사 대상영역으로서 Ir-192는 74.2일의 비교적 짧은 반감기에도 불구하고 방사선투과 비파괴검사에 가장 많이 사용되는 방사성동위원소이다.

2. 시험선원 제조

시험모델로 사용한 Ir-192 밀봉방사선원은 특수형 방사성물질로 분류된다. 특수형 방사성물질은 원자력법규에 따라 외접하는 직방체에 있어서 최소한 한 변이 0.5 cm 이상이며 특수형 방사성물질의 시험조건에 따라 낙하시험 및 타격시험을 행한 경우에 손괴 되지 아니 하고, 가열시험을 행한 경우에 용융 또는 분산되지 아니하고, 침수시험을 행한 경우에 수중의 방사성물질 누설량이 1,850 Bq(50 nCi)을 초과하지 아니하는 기술기준을 충족시키는 방사선원이다.

시험에 사용한 밀봉선원은 하나로를 이용하여 제조하였다. 하나로의 외부노심에 있는 OR(Outer Region) 조사공에 디스크형상의 천연 이리듐금속표적 160장을 조사용기에 장전하여 약 2개월간 조사하였다. 이때 원자로의 운전출력은 24 MW였고 OR 조사공의 평균 열중성자속은 1.85×10^{14} n/cm².sec 정도였다. 조사표적으로 사용한 이리듐 디스크는 직경 2.5 mm, 두께 0.25 mm의 크기로서 한 개의 조사용기에 160장을 중성자 자기차폐효과를 최소화할 수 있도록 배열, 장전하여 조사시켰다. 조사된 이리듐 디스크는 원자력연구소 동위원소 생산시설의 콘크리트 핫셀에서 조사용기를 절단하여 디스크를 분리한 후 개별 디스크의 방사능을 측정하였다. 방사능 측정은 Cs-137을 사용하여 교정한 Radioisotope Calibrator (CAPINTEC, CRC-712RH)를 사용하였으며 방사능 측정기의 교정정수는 0.97이었다. Ir-192 밀봉방사선원은 1차로 스테인레스 재질의 내부캡슐에 총 방사능이 50 Ci 이상이 되도록 조사된 이리듐 디스크를 장전한 후 텅스텐 아크용접방식으로 내부캡슐을 밀봉 용접한다. 밀봉 용접된 내부캡슐은 다시 스테인레스 재질의 외부캡슐에 장전하고 밀봉 용접하여 이중 밀봉 구조를 갖도록 하였다(그림 1). 시험선원의 크기는 내부캡슐이 외경 5.0 mm, 내경 2.65 mm의 크기로 전체 길이가 8.0 mm이며 10장 이상의 디스크를 내장할 수 있다. 외부캡슐은 내부캡슐을 내장하는 캡슐로서 크기는 길이 22.0 mm, 외경 6.35 mm, 내경 5.21 mm 이다.

누설시험을 위하여 3개의 시험선원을 제작하였으며 시험선원의 최종 방사능은 각각 56.2, 50.5, 51.2 Ci 이었다. 각 시험선원의 최종 방사능 값의 조절은 내장하는 디스크의 개수를 변화시켜 조절하였다. 각각의 시험선원에 대하여 내장된 이리듐

디스크의 개별 방사능 값 및 선원 방사능 등의 값을 표 1에 나타내었다. 시험선원의 최종형태인 외부캡슐선원의 방사능 값이 각 개별 이리듐디스크의 방사능 값의 합보다 작아지는 이유는 이리듐에서 방출되는 γ 선이 이리듐 자체 및 스테인레스 재질의 캡슐에서 일부 흡수되기 때문이다.

표 1. 이리듐 디스크 및 누설시험용 Ir-192 밀봉선원의 방사능 측정 값

Source No.	Number of Disc	Max./Min. Activity of Disc (Ci)	Avg. Activity of Disc (Ci)	Correction factor	Activity of Inner Capsule(Ci)	Activity of Outer Capsule(Ci)
ITS-1	9	9.19/8.87	9.03	0.97	58.13	56.2
ITS-2	8	9.22/8.87	9.07	0.97	51.8	50.5
ITS-3	8	9.34/8.73	9.05	0.97	52.9	51.2

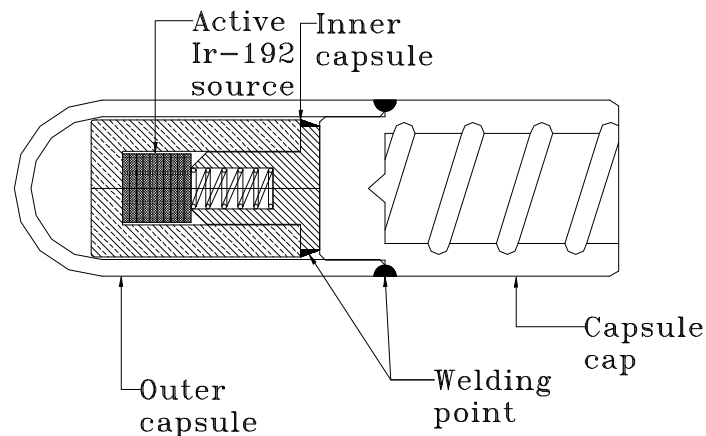


그림 1. 비과괴검사용 Ir-192 밀봉 방사선원의 선원캡슐

3. 시험용액 및 시험장비

밀봉방사선원의 누설시험을 위한 시험용액은 외부선원캡슐의 재질을 손상시키지 않아야 하고 시험조건하에서 외부캡슐에 존재하는 방사성물질을 효과적으로 제거할 수 있는 용액이어야 한다[3]. 이러한 용액에는 약한 세제용액이나 증류수, 농도 5% 미만의 약 알칼리성 또는 산성용액이 사용될 수 있으나 이번 시험에서는 시험용액으로 50 cc의 증류수를 사용하였다. 캡슐에 봉인된 방사성물질의 누설시험에 사용

되는 증류수는 pH 6-8, 최대전도도가 20℃에서 1ms/m(10 μ mho/cm)의 조건을 만족하여야 한다[6].

시험용액에 사용될 증류수 조건을 측정하기 위하여 교정된 pH 측정기(ORION 330) 및 전도도 측정기(ORION 160)를 사용하였다. 시험용액의 pH 및 전도도 측정 시 온도측정과 시험 중 온도조건 감시를 위하여 교정된 유리온도계(HAAKE)를 사용하였다. 누설시험이 완료된 후 시험용액의 방사능 측정을 위해서는 다중채널분석기(Multi-Channel Analyzer, MCA)가 부착된 고순도 반도체검출기(HPGe Detector)를 사용하였다. 누설시험의 시험 온도조건인 시험 중 섭씨 50±5도의 온도유지를 위하여 온도조절이 가능한 Hot Plate와 Water bath를 사용하였다. 각각의 시험 장비는 밀봉선원의 누설시험 관련법규에 따라 교정을 받은 후 사용하였으며 장비 교정은 원자력연구소 및 표준과학연구원에서 수행하였다.

4. 방사능 누설시험

원자력법규에서 규정한 특수형방사성물질의 누설시험조건에 따라 누설시험을 실시하였다. 시험방법은 침출시험법을 사용하였으며 시험을 수행한 용액의 방사능을 측정하여 방사능 누설여부를 검사하였다. 캡슐에 봉인된 특수형방사성물질을 시험의 경우 아래의 시험을 순서대로 행한 후 시험용액의 방사능은 1,850 Bq (50 nCi)을 초과하지 않아야 한다. 이때 시험에 사용되는 용액은 pH 범위가 6-8, 최대전도도가 20℃에서 1ms/m(10 μ mho/cm)의 조건을 만족하여야 한다.

- 1) 섭씨 50±5도의 수중에 4시간 침수시킬 것
- 2) 섭씨 30±5도의 공기 중에 7일간 둘 것
- 3) 섭씨 50±5도의 수중에 4시간 침수시킬 것

시험은 다음 절차에 따라서 수행하였다. 먼저 3개의 밀봉 용접된 방사선원(그림 2)의 방사능을 측정 후 기록한다. 100cc 비이커 3개를 준비하여 각각 50 cc의 pH 및 전도도 조건을 갖춘 시험용액을 비이커에 붓고 밀봉용접된 3개의 선원캡슐을 각각의 비이커에 넣은 후 선원캡슐이 들어있는 3개의 비이커를 온도조절이 가능한 수조에 함께 넣고 가열하여 각 비이커의 시험용액 온도를 섭씨 50±5도에 맞춘다. 이때 교정된 온도계를 사용하여 시험용액의 온도를 확인한다. 시험용액의 온도가 섭씨 50±5도에 도달하면 4시간 동안 침수시키며 그 온도상태를 시험기간동안 유지시킨다(그림 3). 4시간이 경과하면 선원캡슐을 꺼내고 시험용액의 방사능을 측정한다. 1차 누설시험이 끝난 선원캡슐은 핫셀 내부의 온도를 섭씨 30±5 도로 유지한 후 핫셀 안에 7일간 방치한다. 7일 경과 후 각 50cc의 시험용액과 선원캡슐을 100cc 비이커에 다시 넣고 시험용액의 온도를 섭씨 50±5도에 맞추어 2차 누설시험을 4시간동안 실시한다. 4시간이 경과하면 선원캡슐을 꺼내고 시험용액의 방사능을 측정한다. 시험용액의 누설방사능 측정을 위해서 고순도 반도체 검출기를 사용하여 용액의 누설방사능을 측정하였다. 누설시험 후 시험용액의 방사능이 1,850 Bq(50 nCi)을

초과하지 않으면 선원의 누설이 없는 것으로 판정하였다.



그림 2. Ir-192 밀봉방사선원 캡슐

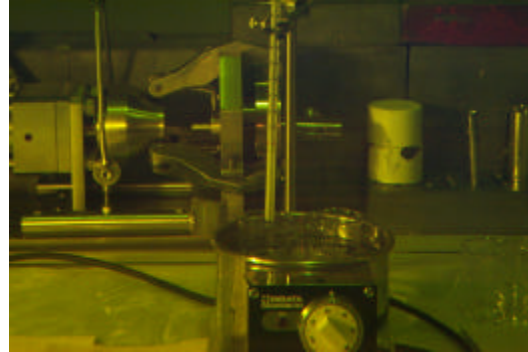


그림 3. 핫셀에서 수행중인 Ir-192 밀봉방사선원의 침수시험

III. 시험결과

Ir-192 밀봉방사선원의 누설시험에 사용된 증류수 용액의 pH, 전도도 및 시험중 시험용액과 핫셀 내부 온도 측정결과를 표 2에 나타내었다. 시험용액의 pH 및 전도도는 용액온도 20℃에서의 측정값이다. 2회의 측정에서 시험용액 pH는 7.16, 7.07의 값으로 시험기준에 적합하였으며 전도도는 각각 0.49, 0.493 mS/m로 최대전도도 1mS/m 이하의 시험조건에 적합하였다. 4시간 누설시험 중 시험용액의 온도는 2회의 시험 모두 49 - 51 ℃의 온도범위를 보여 50±5℃의 시험기준을 충족시켰으며 1차 누설시험 후 Ir-192 선원캡슐의 핫셀내 7일간 방치기간 중 핫셀 내부 온도는 28 - 33℃로 유지되어 시험기준인 30±5℃의 온도조건에 적합하였다.

표 2. 시험용액 및 핫셀의 밀봉방사선원 누설시험조건과 측정결과

Test Item	Test No.	Test Limits	Measured values	Test Results	Remarks
Solution pH	1	6-8	7.16±0.05	○	at 20℃
	2	6-8	7.07±0.05	○	“
Solution Conductivity	1	> 1mS/m	0.49 mS/m	○	“
	2	> 1mS/m	0.493 mS/m	○	“
Solution Temperature	1	50±5℃	49 - 51℃	○	4 hours
	2	50±5℃	49 - 51℃	○	“
Hot-cell Temp.	1	30±5℃	28 - 33℃	○	7 days

누설시험 실시 후 시험용액의 방사능을 MCA가 부착된 HPGe Detector로 측정하여 그 결과를 표 3에 나타내었다. 1차 누설시험의 경우 시료량은 약 1cc를 취하였으며 측정결과 선원 방사능이 56.2, 50.5, 51.2 Ci인 3개의 시험선원에 대한 누설 방사능은 각각 52.12, 9.71, 5.71 Bq로 나타났다. 2차 누설시험에서는 약 20cc의 시료량을 취하여 별도의 측정장비를 사용하여 시험선원의 누설 방사능을 2회 측정하였다. 1회 측정결과 선원 방사능 56.2, 50.5, 51.2 Ci인 3개의 시험선원에 대한 누설 방사능은 각각 6.69, 0.561, 1.415 Bq로 나타났으며 2회 측정의 경우 각각 6.05, 0.28, 1.30 Bq로 나타났다.

표 3. 시험선원의 누설방사능 측정결과

Test No.	Test Source	Sample Vol. (cc)	Activity Concentration (Bq/cc)	Total Activity (Bq/50cc)	Test Results
1	ITS-1	0.895	0.933 ± 0.041	52.12 ± 2.29	○
	ITS-2	0.839	0.163 ± 0.039	9.71 ± 2.32	○
	ITS-3	1.024	0.117 ± 0.019	5.71 ± 0.93	○
2-1	ITS-1	18.683	2.50 ± 0.04	6.69 ± 0.10	○
	ITS-2	18.361	0.206 ± 0.016	0.561 ± 0.043	○
	ITS-3	18.661	0.528 ± 0.011	1.415 ± 0.029	○
2-2	ITS-1	20.0	2.42 ± 0.04	6.05 ± 0.10	○
	ITS-2	20.0	0.11 ± 0.02	0.28 ± 0.05	○
	ITS-3	20.0	0.52 ± 0.01	1.30 ± 0.03	○

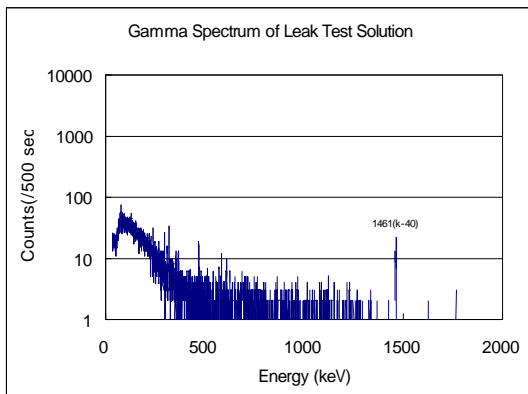


그림 4. 시험용액의 γ 선 스펙트럼 측정결과

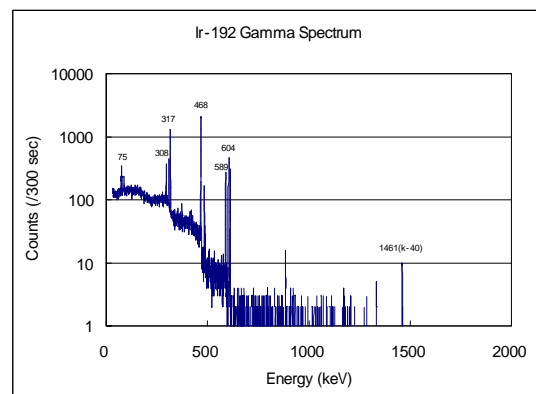


그림 5. 누설이 발생한 경우의 Ir-192 γ 선 스펙트럼 측정결과

어느 경우에도 시험선원의 누설 방사능은 비파괴검사용 밀봉 방사선원의 방사능 누설허용기준인 1,850 Bq(50 nCi)에 비해 훨씬 작은 값으로 하나로를 이용하여 제조한 비파괴검사용 Ir-192 밀봉방사선원의 방사능 밀봉 안전성을 입증할 수 있었다. 이번 시험에서 사용한 시험용액의 γ 스펙트럼 측정결과를 그림 4에 나타내었다. 밀봉방사선원의 누설시험에 사용한 시험용액에서는 Ir-192의 γ 선 피크들이 거의 나타나지 않음을 보여준다. 비교를 위하여 누설이 발생했을 경우의 Ir-192의 γ 선 스펙트럼을 그림 5에 나타내었다.

IV. 결 론

방사선투과 비파괴검사에 사용되는 산업용 Ir-192 밀봉방사선원의 밀봉 안전성을 검증하기 위하여 방사능 누설시험을 실시하였다. 이를 위하여 원자력연구소의 하나로를 이용하여 비파괴검사 현장에서 이용되는 방사능강도수준인 각각 56.2, 50.5, 51.2 Ci의 방사능을 갖는 3개의 시험용 밀봉 방사선원을 제작하였다. 방사능 누설시험은 관련 법규인 과기처고시 제 96-38호 제10조 별지1의 5항 및 IAEA Safety Series No. ST-1. Para. 710 & 711, 그리고 US 10CFR 71.75(d)의 시험항목에 근거하여 침출시험법에 의한 방사능 누설시험을 수행하였다. 누설시험 결과 각각 56.2, 50.5, 51.2 Ci의 방사능 강도를 갖는 3개의 시험선원의 누설방사능은 최대 52.12, 9.71, 5.71 Bq로 측정되었다. 측정된 방사능은 밀봉 방사선원의 방사능 누설허용기준인 1,850 Bq(50 nCi)에 비해 훨씬 작은 값으로 시험 제조한 비파괴검사용 Ir-192 밀봉방사선원의 밀봉 안전성이 입증되었고 이중으로 밀봉 용접된 선원캡슐이 충분한 건전성을 유지하는 것으로 판단되었다.

* 감사의 글 : 본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기계획사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] S. Enomoto, S. Maeda, "A Method of Preparing Ir-192 Gamma-Ray Source of High Specific Activity", J. of Jap. Nuc. Soc., 13, No 6, 312 , 1971.
- [2] ANSI, "American National Standard N542-1977; Sealed Radioactive Sources, Classification", 1978.
- [3] ISO, "Radiation Protection-Sealed Radioactive source-Leakage Test", ISO 9978:1992(E), 1992
- [4] 과학기술처, "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정", 과학기술처 고시 제 96-38호, 1996.
- [5] IAEA Safety Series No.ST-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 1996.
- [6] U.S. Code of Federal Regulations, Title 10, Part 71, "Packaging of Radioactive Material for Transport and Transportation of Radioactive Material under Certain Conditions", as revised in Fedral Register, Vol. 48, No. 165, 1983
- [7] Lederer C.M., et al., "Table of Isotopes", 7th Ed., P. 1229, John Wiley & Sons, 1978