

'98 춘계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 특수형방사성물질 봉인캡슐의 기술기준에 의한 안전성시험

서기석 · 방경식 · 한현수 · 조운갑 · 민덕기 · 노성기  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

원자력연구소의 연구용 원자로인 하나로(HANARO)에서 생산되는 방사성동위원소인 Ir-192를 안전하게 운반하기 위해 특수형방사성물질 봉인캡슐을 제작하여 국내·외 수송관련법규인 과기처 고시 제 96-38호, IAEA Safety Series No. ST-1 및 미국 10 CFR Part 71의 규정에 따라 원자력연구소내의 수송용기 안전성시험시설에서 특수형 방사성물질인 Ir-192 봉인캡슐에 대한 안전성시험분석을 수행하였다.

### 1. 서 론

국내 과기처 고시 제 96-38호<sup>1</sup>, IAEA Safety Series No. ST-1<sup>2</sup> 및 미국 10 CFR Part 71<sup>3</sup>에서는 특수형 방사성물질에 대해 “특수형 방사성물질은 확산되지 않는 고체 방사성물질 및 방사성물질을 포함하는 봉인된 캡슐로서, 적어도 한 면이 5mm보다 크고, 물리적인 힘에 의한 파괴에 의해서만 열 수 있는 것”이라고 정의하고 있다. “특수형 방사성물질은 낙하시험, 타격시험 및 굽힘시험을 수행한 경우 손케 되지 아니하고, 가열시험에 있어서는 용융 또는 분산되지 아니하며, 각각의 시험 후 침수시험을 수행한 경우 수중에서의 방사성물질 누설량이 1,850 베크렐(0.05  $\mu$  Ci)을 초과하지 않아야 한다. 특히 봉인캡슐에 대해서는 ISO/TR 4826-1979(E)<sup>4</sup>에서 규정한 누설시험으로 대체 시험할 수 있으며 적용승인 기준을 초과하지 아니할 것이라고 명시하고 있다. 대체 누설시험의 기준은 IAEA Safety Series No.37<sup>5</sup>에서 불용성 고체의 경우의 누설량  $10^{-5}$  pa.m<sup>3</sup>/s은 2 kBq(50 nCi)와 동등하게 고려한다고”이라고 명시하고 있다.

따라서, 연구용 원자로인 하나로에서 생산되는 특수형 방사성물질인 Ir-192를 운반하기 위한 봉인캡슐(sealed capsule)에 대한 안전성시험평가를 수행하였으며, 이러

한 시험적용 대상은 Pig-tail을 포함한 전체 어셈블리에 대해 적용한 것이 아니라 방사선원 캡슐(source capsule)을 외부캡슐(outer capsule)에 넣고, cap connector와 외부 캡슐이 용접된 부분으로, 전체 어셈블리의 앞부분에만 적용하였으며, 12개의 봉인캡슐을 사용하여 각각의 시험을 3차례씩 수행하여 특수형 방사성물질인 Ir-192 봉인캡슐에 대한 안전성을 평가하였다.

## II. Ir-192 봉인캡슐 안전성시험

### 1. 시험모델(Pig-tail 포함)

특수형 방사성물질 봉인캡슐은 방사선원 캡슐, 방사선원 캡슐을 내장한 외부 캡슐, 외부 캡슐에 연결하는 wire cable 및 wire cable을 조사용기(Irradiator)의 원격제어에 연결하기 위한 stop ball등의 연결부위로 구성되어 있으며, 안전규제기관의 인증을 받은 조사용기에 장착되어 산업용 비파괴검사에 사용되게 되며, 표 1에서는 봉인캡슐의 재질 및 치수를 나타내고 있다.

방사선원 캡슐은 스테인레스강(SUS304)으로 외경  $\phi 5\text{mm}$ , 내경  $\phi 2.7\text{mm}$ 에 길이 8mm의 실린더 형상이며, 외부 캡슐은 외경  $\phi 6.33\text{mm}$ , 내경  $\phi 5.21\text{mm}$ 에 길이 13.5mm인 cap과 외경  $\phi 6.33\text{mm}$ , 내경  $\phi 4.8\text{mm}$ 에 길이 10.88mm인 cap connector로 구성하였으며 스테인레스강(SUS304)으로 제작하였다. 외부 캡슐에 연결하는 wire cable은 중심선 직경  $\phi 3.6\text{mm}$ , 외부 나선형 직경  $\phi 4.8\text{mm}$ 에 길이 151.44mm인 steel로, stop ball은 길이 5.8mm인 스테인레스강(SUS304)로 제작하였으며, 선원어셈블리 전체길이는 182mm, 외부 캡슐부분의 길이는 22mm, 조사용기 연결부분의 길이는 31mm이다. 특수형 방사성물질인 Ir-192 봉인캡슐에 대한 안전성분석을 위한 시험에서는 외부 캡슐부분에 한하여 수행하였다.

### 2. 시험설비 및 장치

낙하시험은 높이 15m에 H-beam Truss 구조물로서 10톤 용량의 hoist를 갖춘 낙하시험설비에서 수행하였으며, 타격시험과 굽힘시험은 높이 5m, 단면 1.14 × 1.14m의 사각기둥 형상을 한 Drop Weight 장치에 타격장치(사진 1)를 설치한 후 두께 2.5cm의 납판과 바이스를 설치한 후 시험을 수행하였다. 가열시험(사진2)은 최고온도 1200°C까지 가열할 수 있는 12kW의 용량을 가진 전기로에서 수행하였으며, 누설시험은 진공도 200 l/min에 진공용적이 직경 150mm, 높이 300mm인 Vacuum Bubble 장치(사진 3)에서 수행하였다.

### 3. 시험방법

#### 낙하시험

낙하시험전 법규에서 규정한 사항에 따라 시험을 수행한 시험물인지 여부를 확인

한 후 10분간의 누설시험을 수행하여 누설이 발생하지 않음을 확인하고 봉인캡슐을 낙하시험시설의 Release 장치에 넣은 후 Release 장치를 Hoist에 매달아 9m 높이로 들어올린 후 낙하시험시설의 단단하고 평평한 바닥면에 자유낙하 시켰다.

#### 타격시험

타격시험을 수행할 봉인캡슐에 대해 시험을 수행한 시험물인지 여부를 확인한 후 10분간의 누설시험을 수행하여 누설이 발생하지 않음을 확인하고 타격장치의 바닥면에 2.5cm 두께의 납판을 설치하고, 납판위에 봉인캡슐을 올려놓은 후, 직경 2.5cm, 모서리 반경 0.3cm이며 무게 1.4kg인 강철봉을 Release 장치에 매달아 1m 높이로 들어올린 후 강철봉을 봉인캡슐을 향해 자유낙하 시켰다.

#### 굽힘시험

굽힘시험을 수행할 봉인캡슐에 대해 시험을 수행한 시험물인지 여부를 확인한 후 10분간의 누설시험을 수행하여 누설이 발생하지 않음을 확인하고 사진 1과 같이 굽힘장치의 바닥면에 봉인캡슐을 고정할 바이스를 설치하고, 봉인캡슐이 길이방향으로 1/2이 나오도록 바이스에 단단히 고정된 후 직경 2.5cm, 모서리 반경 0.3cm이며 무게 1.4kg인 강철봉을 Release 장치에 매달아 1m 높이로 들어올린 후 강철봉을 봉인캡슐을 향해 자유낙하 시켰다.

#### 가열시험

가열시험을 수행할 봉인캡슐에 대해서도 역시 시험을 수행한 시험물인지 여부를 확인한 후 10분간의 누설시험을 수행하여 누설이 발생하지 않음을 확인하고 전기로의 온도를 800°C로 setting한 후, 봉인캡슐을 전기로의 내부에 넣고 전류계를 이용하여 전기로의 온도를 점진적으로 가열하여 800°C의 온도상태가 되었을 때 그 온도상태를 10분간 유지한 후 봉인캡슐을 자연 냉각시켰다.

### III. 시험결과

특수형 방사성물질인 Ir-192 봉인캡슐에 대한 안전성시험분석에서는 봉인캡슐의 개요에서 나타낸 사항 중 방사선원 캡슐을 내장한 외부 캡슐 부분에 한한 시험을 수행하여 안전성을 분석하였으며, 시험결과는 표 2에 나타내었다.

낙하시험 결과 변형은 타격위치에서 약간의 흠집만 발생하였고 봉인캡슐은 부수어지거나 흠뜨러지지 않았다. 타격시험 결과 봉인캡슐은 1차와 2차 시험에서는 타격면에서 직경이 0.01 mm 감소되었으며, 그 수직방향에서는 직경이 0.01 mm 증가되었고 사진 4와 같이 납판은 운반캡슐의 형상으로 깊이 0.3~0.65 mm로 찌그러졌을 뿐 운반캡슐은 부수어지거나 흠뜨러지지 않았다. 굽힘시험 결과에서는 사진 5와 같이 봉인캡슐의 외관에 굽힘 현상이 명백히 발생하였으며, 1차 굽힘시험결과는 타격봉이 봉인캡슐의 끝단에 타격되어 미끄러짐으로써 변형도가 작아졌으며, 2, 3차 굽힘결과는 표3과 같이 타격면에서의 변형각도  $\theta_1$ 는 15° 와 13° 로 크게 나타났으며 타격 반대면에서는 변형각도  $\theta_2$ 는 11° 와 10° 로 작게 나타났고, 법규에서 규정

한 것과 같은 부수어지거나 흐트러진 현상은 발생치 않았다. 가열시험 결과는 사진 2와 같이 봉인캡슐의 외관이 고온에 의해 가열된 영향으로 표면의 색상만이 변했을 뿐(은색→짙은 황동색) 용융되거나 분산되지 않았다.

누설시험은 낙하, 타격, 굽힘, 및 가열시험의 전후에 수행하였으며, 누설시험은 누설조건인 절대압 15~25mm 조건에서 표2에서와 같이 누설시험결과 역시 bubble이 발생치 않아 누설량  $10^{-5}$  pa.m<sup>3</sup>/s이하이므로 모든 시험조건에서의 봉인캡슐은 안전한 것으로 판단된다.

## N. 결 론

특수형 방사성물질인 Ir-192 방사선원 봉인캡슐에 대한 낙하, 타격 및 굽힘 조건에 대한 시험결과에서는 굽힘 조건에 있어서만 외관상 큰 변형이 발생하였을 뿐 별다른 손상이 발생하지 않았으며, 각각의 시험을 수행한 후 실시한 누설시험에서 어떠한 bubble도 발생하지 않아 구조적으로 건전성이 유지되는 것으로 나타났다. 이것은 9m 낙하조건에 대한 시험에서는 봉인캡슐 자체 중량인 약 3.4g 만이 하중조건으로 작용하여 자유낙하하기 때문에 운반 캡슐이 별다른 손상을 받지 않는 것으로 판단되며, 납판위에 봉인캡슐을 올려놓고 1.4kg의 타격봉으로 봉인캡슐을 타격하는 타격조건에서는 1.4kg의 타격봉에 의해 가해지는 충격량을 완충제 역할을 하는 납판이 흡수하여 봉인캡슐에는 손상이 가지 않는 것으로 판단된다. 봉인캡슐을 완전히 고정한 후 1.4kg의 타격봉으로 봉인캡슐을 타격하는 굽힘조건에서는 방사선원 캡슐을 내장한 외부 캡슐이 완충 역할을 수행하여 외부 캡슐이 사진 5와 같이 굽힘현상이 발생할 뿐 방사선원 캡슐에는 균열이 가지 않는 것으로 판단되며, 외부 캡슐 역시 굽힘현상만 발생하였을 뿐 법규에서 규정하고 있는 손상은 발생치 않았다.

가열조건에 대한 시험결과에서는 사진 2와 같이 외관상의 캡슐색이 은색에서 황동색으로 변했을 뿐 어떠한 손상도 없었으며, 시험 후 수행한 누설시험에서 역시 bubble이 발생치 않아 열적 건전성이 충분히 유지되는 것으로 나타났다. 이것은 봉인캡슐에 의해 운반되는 특수형 방사성물질인 Ir-192 방사선원 자체의 붕괴열이 매우 미세하고 가열시간도 10분 정도로 작기때문에 열적으로 별다른 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

따라서, 특수형 방사성물질인 Ir-192 방사선원 봉인캡슐은 각 시험후 누설기준이 2 kBq(50 nCi)와 동등한 누설량  $10^{-5}$  pa.m<sup>3</sup>/s이하이므로 구조적 및 열적 건전성이 충분히 유지되는 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 과학기술처, “방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정”, 과학기술처 고시 제 96-38호, 1996.

2. IAEA Safety Series No.ST-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 1996.
3. 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 Federal Register, Vol. 48, No. 165, 1983.
4. ISO/TR 4826-1979(E), "Sealed Radioactive Sources - Leak Test Method", 1979.
5. IAEA Safety Series No.37, "Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material", 1985 ed, 1990.

표 1. Dimensions and Materials of a Ir-192 Shipping Capsule

Component	Material	Dimension
방사선원 캡슐 외부 캡슐	SUS304	OD : $\phi$ 5mm, ID: $\phi$ 2.7mm, L : 8mm
- Source Cap	SUS304	OD : $\phi$ 6.33mm, ID: $\phi$ 5.21mm, L : 13.5mm
- Cap Connector	SUS304	OD : $\phi$ 6.33mm, ID: $\phi$ 4.8mm, L : 10.88mm
Wire Cable	Steel	중심선직경: $\phi$ 3.6mm, 나선형직경: $\phi$ 4.8mm
Stop Ball	SUS304	L : 5.8mm

표 2. Test Results of a Ir-192 Shipping Capsule

시험 구분	변형도 결과			누설시험 결과	비 고
	1차	2차	3차	1~3차	
낙 하 시험	거의 변형 없음			○	약간의 흠집만 있음
타 격 시험	직경 6.32 ~6.34 mm	직경 6.32 ~6.34 mm	직경 6.23 ~6.4 mm	○	납판이 찌그러들 깊이 0.3~0.65 mm
굽 힘 시험	각도 3° ~5°	각도 11° ~15°	각도 10° ~13°	○	캡슐 굽힘현상 발생
가 열 시험	거의 변형 없음			○	변색(은색 → 황동색)

\* 누설시험 : Bubble이 발생치 않음(○), Bubble이 발생(X)

표 3. Dimension of Specimens after Bending Test

구분 시험	변형각도	시편직경	
		변형전 치수	변형치수
굽힘시험 1	$\theta_1 = 5^\circ$ , $\theta_2 = 3^\circ$	6.33mm	X
굽힘시험 2	$\theta_1 = 13^\circ$ , $\theta_2 = 10^\circ$	6.33mm	5.85mm
굽힘시험 3	$\theta_1 = 15^\circ$ , $\theta_2 = 11^\circ$	6.33mm	5.6mm



사진 1. 굽힘장치.



사진 2. 가열시험 후 시편형상.

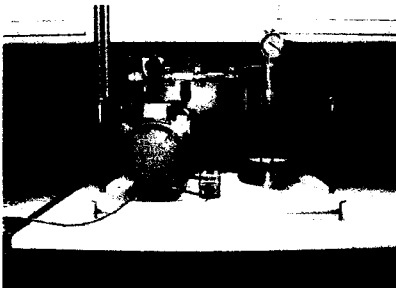


사진 3. Vacuum Bubble 장치.

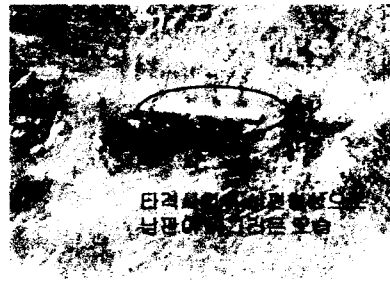


사진 4. 타격시험 후 납판형상.

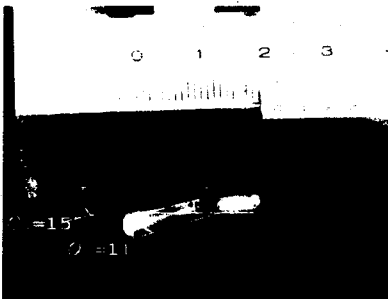


사진 5. 굽힘시험 후 시편형상.