

## Safety Evaluation of a Shipping Capsule for Special Form Radioisotope

Ju-Chan Lee, Ki-Seog Seo, Jeong-Hoe Ku, Kyoung-Sik Bang,  
Hyon-Soo Han and Seong-Won Park  
Korea Atomic Energy Research Institute

### 특수형 방사성 동위원소 운반캡슐의 안전성 평가

이주찬 · 서기석 · 구정회 · 방경식 · 한현수 · 박성원  
한국원자력연구소

(2000년 11월 17일 접수, 2001년 3월 20일 채택)

**Abstract** - All of sealing capsules to transport a special form radioactive material should be designed and fabricated in accordance with the design criteria prescribed in IAEA standards and domestic regulations. The objective of this study is to demonstrate the safety of a shipping capsule for  $^{192}\text{Ir}$  special form radioisotope which produced in the HANARO. The safety tests were carried out for the impact, percussion, bending and heat test conditions. And leakage tests were carried out before and after the each test. Also, the safety analyses were performed using computer codes in order to verify the test results. The capsule showed slight scratches and deformation, and maintained its structural and thermal integrities in all tests without any severe damage or melting. It also met the allowable limits of leakage rate after each test. Therefore, it has been verified that the capsule was designed and fabricated to meet all requirements for the special form.

**Key words** : special form radioactive material, shipping capsule, safety test, safety analysis

**요약** - 특수형 방사성물질 운반캡슐은 국내외의 수송관련 법규에 규정된 기술기준을 만족하도록 설계, 제작되어야 한다. 본 연구의 목적은 하나로에서 생산된  $^{192}\text{Ir}$  특수형 동위원소 운반캡슐의 건전성을 평가하는데 있다. 법규에서 규정된 낙하시험, 타격시험, 굽힘시험 및 가열시험조건에 대한 안전성 시험을 수행하였으며, 각각의 시험 전후에 누설시험을 수행하였다. 또한, 안전성시험과 더불어 컴퓨터 코드를 이용한 전산해석을 수행하여 안전성시험 전에 시험결과에 대한 예측자료로 활용되었다. 낙하시험 및 가열시험 결과 캡슐 표면에서 약간의 흠집과 변형이 발생하였으나, 각각의 시험에서 평가기준이 되는 캡슐의 손상이나 용융 등은 발생하지 않았다. 또한 각 시험 후 수행한 누설시험 결과 누설이 발생하지 않았다. 따라서 특수형 방사성물질 운반캡슐은 법규에서 규정하는 기술기준을 만족하도록 설계, 제작되었음이 입증되었다.

**중심어** : 특수형방사성물질, 운반캡슐, 안전성시험, 안전성해석

### 서 론

방사성 동위원소는 의료분야, 산업분야, 농학분야 등에서 널리 사용되고 있다. 산업용 방사선원은 주로 비파괴 검사용으로 사용되며, 산업발달과 따

라 그 수요량도 크게 증가되는 추세이다. 방사성 동위원소의 수요량 증가와 더불어 동위원소를 안전하고 효율적으로 운반하기 위한 운반캡슐 및 운반용기의 필요성이 대두되고 있다. 원자력연구소의 하나로(HANARO)에서 생산되는 특수형 방사

성동위원소 <sup>192</sup>Ir를 안전하게 운반하기 위해 방사성물질 운반캡슐을 제작하여 수송관련 법규에 규정된 기술기준에 따라 안전성평가를 수행하였다.

국내 과기부 고시 제 96-38호[1], IAEA Safety Standards Series No. ST-1[2] 및 미국 10 CFR Part 71[3]에서 특수형 방사성물질 운반캡슐은 낙하시험, 타격시험 및 굽힘시험 후에 손상되지 않아야 한다고 규정되어 있다. 가열시험에 있어서는 용융 또는 분산되지 않아야 하고, 각각의 시험 후 침수시험을 수행할 경우 수중에서의 방사성물질 누설량이 1,850 Bq을 초과하지 않도록 규정되어 있다. 특수형 방사성물질은 확산되지 않는 고체 방사성물질 및 방사성물질을 포함하는 밀봉 캡슐을 의미하며, 다음과 같은 요구조건을 갖는다.

첫째, 특수형 방사성물질은 적어도 한 면이 5 mm보다 커야 한다.

둘째, 특수형 방사성물질 캡슐은 물리적인 힘에 의한 파괴에 의해서만 열 수 있다.

셋째, 특수형 방사성물질은 국내·외 관련법규에서 규정한 시험을 필요로 할 때 아래에서 요구하는 조건에 만족하도록 설계되어야 한다.

- 충격, 타격 및 굽힘시험 후 깨지거나 분산되지 아니할 것.
- 가열시험 후 용융되거나 확산되지 아니할 것.
- 침수시험에서는 방사성물질 누설량이 2,000 Bq을 초과하지 않아야 하며, 밀봉 캡슐에 대해서는 ISO/TR 4826-1979(E)[4]에서 규정한 누설시험으로 대체 시험할 수 있으며, 적용승인 기준을 초과하지 않도록 명시되어 있다. IAEA Safety Series No.37[5]에서는 대체 누설시험에서 불용성 고체의 경우  $10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ , 가용성 고체 및 유체의 경우  $10^{-7} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 를 2,000 Bq과 동등하게 고려한다고 명시되어 있다.

넷째, 각각의 시험에 대해서는 각기 다른 시험을 사용하여야 한다.

특수형 방사성물질 운반캡슐은 dummy source disc를 내장한 선원 캡슐, 선원 캡슐을 내장한 외부 캡슐, 외부 캡슐에 연결하는 wire cable 및 wire cable을 조사기(irradiator)의 원격제어에 연결하기 위한 stop ball등의 연결부위로 구성되며, 안전규제기관의 인증을 받은 조사기에 장착되어 산업용 비파괴검사에 사용된다.

그림 1은 운반캡슐의 개략도를 보여주고 있으며, 표 1은 운반캡슐의 재질 및 치수를 나타내고 있다. 격납경계를 이루는 선원 캡슐은 외경 5 mm, 내경 2.7 mm, 두께 0.57 mm, 길이 8 mm의 스테인

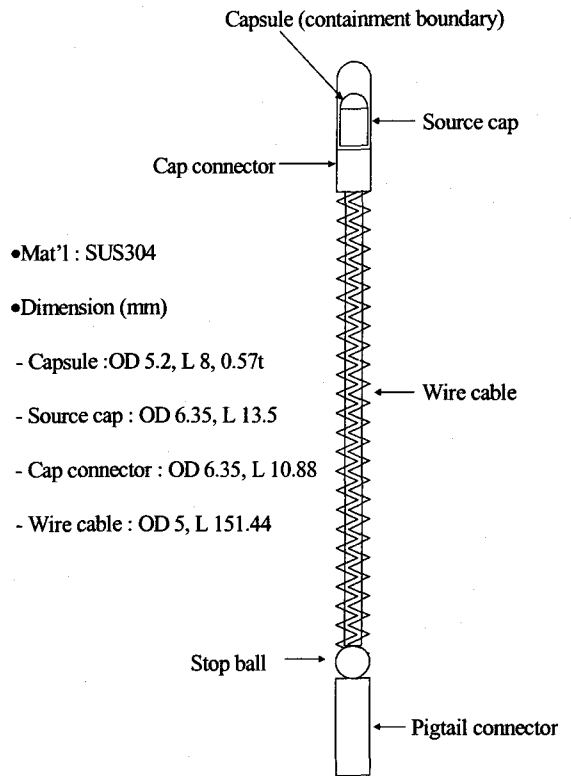


Fig. 1. Schematic drawing of special form.

Table 1. Dimensions and materials of a special form capsule.

Component	Material	Dimension (mm)
Source capsule	SUS304	OD : $\Phi$ 5, ID : $\Phi$ 2.7, L : 8, 0.57t
Outer capsule		
-Source cap	SUS304	OD : $\Phi$ 6.35, ID : $\Phi$ 5.21, L : 13.5
-Cap connector	SUS304	OD : $\Phi$ 6.35, ID : $\Phi$ 4.8, L : 10.88
Wire cable	Steel	중심선직경 : $\Phi$ 3.6, 나선형직경 : $\Phi$ 4.8
Stop ball	SUS304	L : 5.8

레스강으로 구성되며, dummy disc를 진공흡입기와 원격조종기를 사용하여 캡슐 본체에 장입한 후 캡을 덮은 후 용접하여 제작하였다. 외부 캡슐은 캡과 캡 연결부로 구성되며, 스테인레스강으로 제작하였다. 외부 캡슐에 연결하는 wire cable은 steel로, stop ball은 스테인레스강으로 제작하였으며, 선원어셈블리의 전체 길이는 182 mm, 외부 캡슐부분의 길이는 22 mm, 조사기 연결부위의 길이는 31 mm이다.

## 시험방법 및 절차

### 안전성시험 방법 및 절차

법규에서 규정하고 있는 낙하, 타격, 굽힘 및 가열시험조건에 대하여 안전성시험을 수행하였으며, 모든 시험 전 후에 누설시험을 수행하였다. 이러한 시험적용 대상은 pig-tail을 포함한 전체 어셈블리에 해당되는 것이 아니라 선원 캡슐을 외부 캡슐에 넣고, 캡 연결부와 외부 캡슐이 용접된 부분으로, 전체 어셈블리의 앞부분에만 적용하였으며, 12개의 운반캡슐을 사용하여 각각의 시험을 3차례씩 수행하였다.

낙하시험조건은 시편을 9 m 높이로부터 바닥면에 낙하시키는 조건이며, 이때 바닥면은 수평면이고 바닥면의 특성은 시편의 충격으로 변위 혹은 변형에 의한 바닥면의 저항 증가가 시편에 대한 손상을 크게 증가시키지 않아야 한다. 원자력연구소의 수송용기 안전성시험시설에 설치된 그림 2의 낙하시험설비를 사용하여 낙하시험을 수행하였다. 시편을 낙하시험시설의 release 장치에 넣은 후 release 장치를 호이스트에 매달아 9 m 높이로 들어올린 후 낙하시험시설의 단단하고 평평한 바닥면에 자유낙하시켰다.

타격시험조건은 시편을 매끄러운 납판 위에 놓고, 1 m 높이에서 1.4 kg의 물체를 자유 낙하시킬 경우와 동등한 충격력으로 최대의 파손이 미치도록 강철제 환봉의 평단면으로 타격시키는 조건으로 강철제 환봉의 평단면의 직경은 2.5 cm이며, 평단면의 각진 모서리 부분의 반경은  $0.3 \pm 0.03$  cm인 것이어야 한다. 납판의 두께는 2.5 cm보다 크지 않고, 빅커스 경도가 3.5~4.5의 범위를 가져야 한다. 납판 면적은 시편 면적보다 커야 하며, 타격시험시마다 납판의 새로운 면을 사용하여야 한다. 그림 3과 같이 타격장치의 바닥면에 2.5 cm 두께의 납판을 올려놓고, 납판 위에 시편을 올려놓은 후, 중량 1.4kg인 강철봉을 1m 높이에서 시편을 향해 자유낙하시켰다.



Fig. 2. Drop test facility.



Fig. 3. Percussion test.

굽힘시험은 최소 한 변의 길이가 10 cm이고 폭에 대한 길이의 비율이 10보다 작지 않은 가늘고 긴 시편에 대해 적용되며, 시편은 수평으로 고정시키는 기기로부터 2분의 1이 나오도록 고정시키고, 1 m 높이에서 1.4 kg의 물체를 자유 낙하시킬 경우와 동등한 충격력으로 최대 파손이 미치도록 강철제 환봉의 평단면으로 타격한다. 굽힘장치의 바이스에 시편을 단단히 고정된 후 직경

2.5 cm, 모서리 반경 0.3 cm, 중량 1.4 kg인 강철봉을 1m 높이에서 시편을 향해 자유낙하시켰다.

가열시험조건은 시편을 800 °C로 가열하여 그 온도상태를 10분간 유지한 후 냉각시키는 조건이다. 전기로의 온도를 800 °C로 설정한 후, 시편을 전기로의 내부에 넣고 전류계를 이용하여 전기로의 온도를 점진적으로 가열하여 800 °C 상태에서 10분간 유지한 후 자연냉각시켰다.

낙하, 타격, 굽힘시험 및 가열시험에 전후에 누설시험을 수행하도록 규정되어 있으며, IAEA Safety Standards Series No. ST-1 및 Safety Series No. 37에서 명시하고 있는 "밀봉 캡슐의 경우에 ISO/TR 4826-1979(E)의 방사성물질 선원-누설시험으로 침수시험을 대체할 수 있다"고 명시한 내용에 따라 시험물을 유체가 들어있는 진공 chamber에 넣고 chamber내의 압력을 15~25 kPa 정도 감압시킨 후 적어도 1분 이상동안 그 상태로 유지시키는 누설시험을 수행하였다. 그림 4는 누설시험을 위한 진공 bubble 장치들 보여주고 있다.

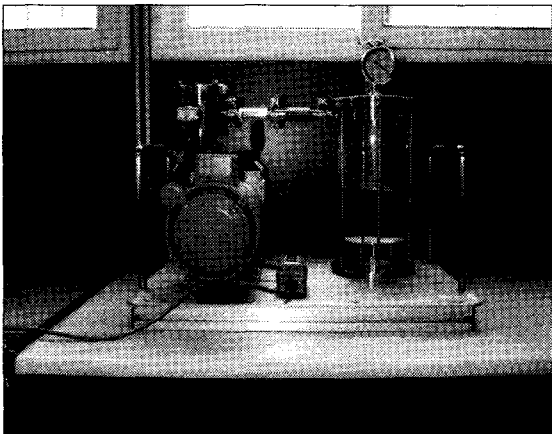


Fig. 4. Vacuum bubble equipment.

**안전성해석 방법 및 절차**

방사성동위원소인 <sup>192</sup>Ir를 운반하는 특수형 방사성물질 운반캡슐에 대한 안전성 평가를 위하여 안전성시험과 더불어 각각의 시험조건에 대한 안전성해석을 수행하였다. 낙하, 타격 및 굽힘시험조건에 대하여 충돌해석 기능이 우수한 LS-DYNA3D 코드를 사용하여 전산해석을 수행하였으며, 가열시험조건에 대해서는 열전달 및 열응력 해석을 수행하여 캡슐의 열적 진전성을 평가하였다.

낙하조건에 대한 구조해석에서는 캡슐이 9 m 높이에서 자유낙하 하여 운반캡슐이 전단의 모서

리 부분으로 낙하하여 충돌하는 것으로 가정하였다. 그림 5는 낙하해석 모델을 나타내며, 총 4,560개의 절점과 3,040개의 입체요소를 사용하여 모델링하였고, 바닥면은 용기의 바닥면의 바로 아래의 공간에 고정되어 있는 단단한 강체 평면으로 가정하였다. 강체면을 제외한 용기 모델의 모든 절점들은 9 m 높이에서 자유낙하로 인해 충돌초기에 갖게되는 13.3 ms<sup>-1</sup>의 초기 속도를 하중조건으로 고려하였다. 용기의 대칭성을 이용하여 1/2 단면을 3차원 모델을 사용하고, 대칭면인 중앙면의 모든 절점은 대칭경계조건을 적용하였으며, 다른 모든 부분은 자유롭게 움직이도록 하였다. 용기 본체의 캡 부분과 캡을 막아주는 캡-연결부 부분과의 접촉부위는 구속 접촉요소(tied-interface element)를 사용하여 구속시켰다. 그리고 캡 내부에 삽입되어 있는 캡슐은 캡 내부에 위치하여 캡 및 캡-연결부 등의 어느 면과도 자유롭게 접촉할 수 있도록 하였다. 사용재료는 격납경계를 이루는 캡 내부의 캡슐만 탄성으로 고려하고 나머지는 모두 탄소성으로 가정하여 실제에 가까운 해석이 되도록 하였다.

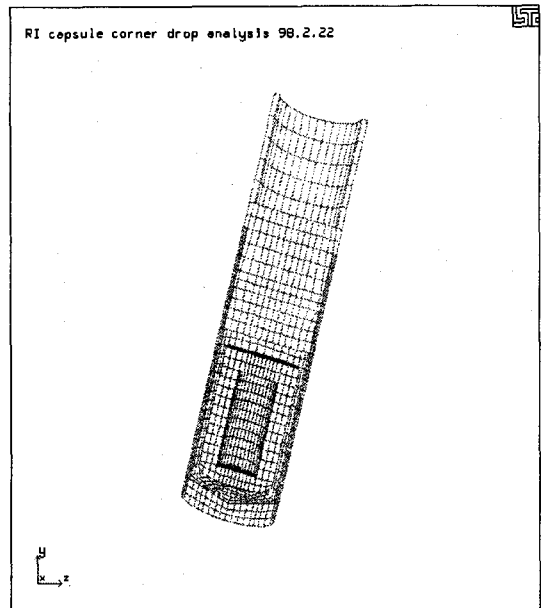


Fig. 5. Drop test analysis model.

타격조건 해석에서는 운반캡슐을 평평한 납판 위에 놓고 직경 2.5 cm, 중량 1.4 kg인 강철 환봉을 1 m 높이에서 자유낙하 하여 타격하는 조건으로 가정하였다. 그림 6은 해석모델을 나타내며, 하중조건으로는 타격 환봉의 전체에 1 m 자

유낙하로 인한 타격속도  $4.429 \text{ ms}^{-1}$ 의 초기속도를 고려하였다. 타격 환봉 전체 길이를 모델링할 경우 절점과 요소수가 너무 많게 되어 환봉의 길이를 2 cm 길이로 가정하고 1.4 kg 환봉의 무게에 해당하는 등가밀도(equivalent density)를 고려하였다.

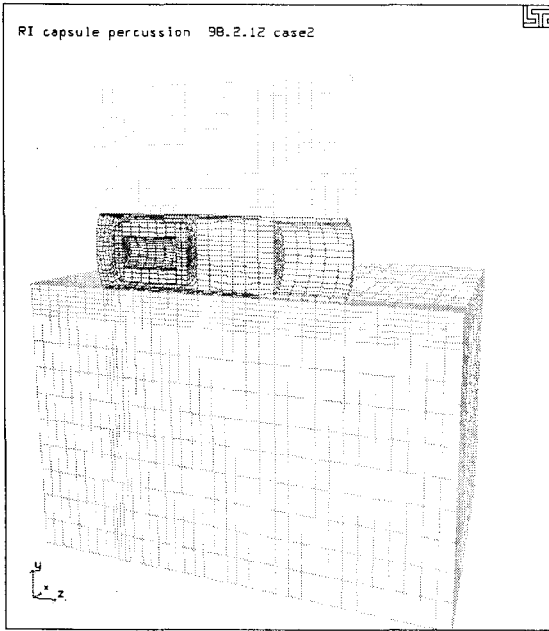


Fig. 6. Percussion test analysis model.

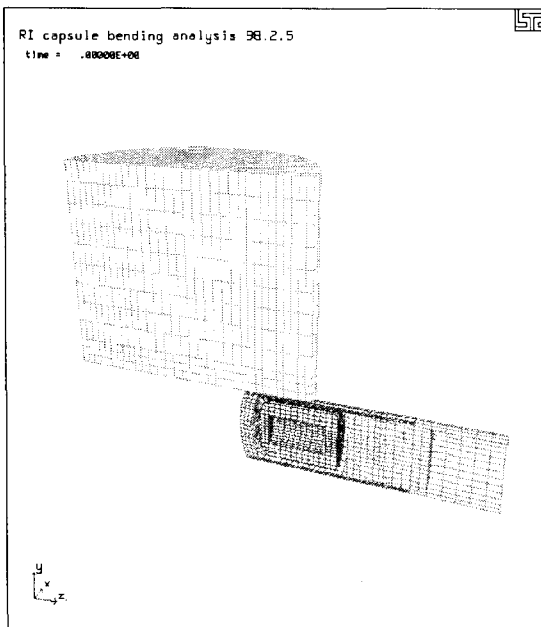


Fig. 7. Bending test analysis model.

굽힘조건에 대한 해석에서는 운반캡슐을 수평으로 고정시키고 중량 1.4 kg인 강철 환봉으로 1 m 높이에서 자유낙하 시키는 조건으로 가정하였다. 그림 7은 굽힘조건 해석모델로 하중조건으로는 타격 환봉의 전체에 1 m 자유낙하로 인한 타격속도  $4.429 \text{ ms}^{-1}$ 의 초기속도를 타격 환봉에 부여하였다.

가열조건에 대한 열전달해석을 수행하여 온도분포를 구하고 이 온도조건에 대한 열응력 그리고 압력해석을 수행하여 캡슐의 건전성을 평가하였다. HEATNG7.2 코드를 사용하여 열전달해석을 수행하였으며, 이 코드는 정상상태(steady state) 및 과도상태(transient)에 대한 열해석이 가능하다. 그림 8은 2차원 열전달 및 열응력해석 모델이며, 해석모델은 동위원소 선원 및 선원을 보호하는 캡슐, 그리고 캡슐을 보호하는 캡 및 연결부로 구성된다. 열전달해석을 위한 초기온도는 상온인  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 하였으며, 이 온도에서  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 10분간 가열한 후 자연 냉각되는 조건에서 시간의 변화에 따른 과도상태(transient state)에 대한 해석을 수행하였다. 가열시험조건에서 캡슐의 구조적 건전성 평가를 위하여 구조해석 프로그램인 ABAQUS 코드를 사용하여 열응력해석을 수행하였다. 해석 모델은 그림 8과 같이 wire cable 등은 제외하고 선원 캡슐, 선원 캡 및 캡 연결부만을 모델링 하였으며, 140개의 절점과 72개의 요소로 구성된다. 하중조건은 캡슐 모든 부위의 온도가  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 인 것으로 하였다. 격납경계를 이루고 있는 캡슐은 가상사고조건에서도 항복을 일으키지 않아야 하므로 캡슐은 탄성해석으로 선원 캡 및 캡 연결부는 탄소성해석을 수행하였다.

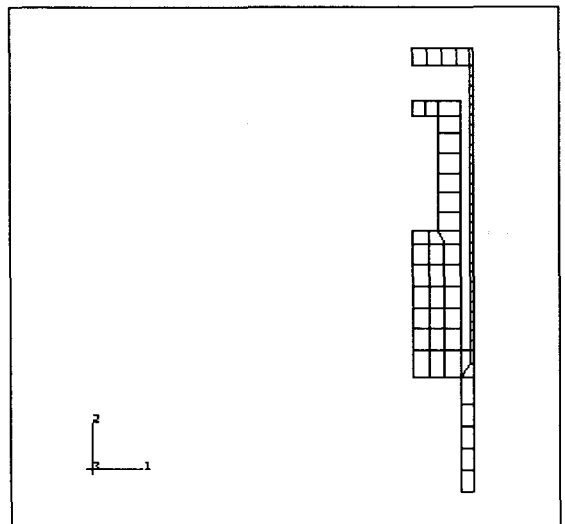


Fig. 8. Thermal analysis model.

## 결과 및 고찰

### 안전성시험 평가

낙하시험, 타격시험, 굽힘시험, 가열시험조건에 대하여 안전성시험을 수행하였으며, 모든 시험 전후에 누설시험을 수행하였다. 누설시험 후 시편으로부터 bubble이 발생치 않을 경우 누설 기준치인  $10^{-5}$  Pa·m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>를 초과하지 않는 것으로서 누설 여부를 평가하였다.

시편을 9 m 높이로부터 자유낙하시키는 낙하시험 결과 시편 표면에 약간의 흠집만이 발생하였을 뿐 시편이 부수어지거나 흠뜨려지지 않았다. 낙하시험 후 누설시험 결과 bubble이 발생하지 않아 낙하조건에서 캡슐은 안전한 것으로 평가되었다.

타격시험조건은 시편을 납판 위에 올려놓고, 1.4 kg의 강철 환봉을 1 m 높이에서 낙하시키는 조건이며, 시험결과 납판이 시편의 형상으로 약 0.3 ~ 0.65 mm 정도 찌그러 들었고 시편의 직경이 약 0.01 mm 감소하였다. 그렇지만 시편의 손상은 발생되지 않았으며, 타격시험 후 누설시험 결과에서도 bubble이 발생치 않아 타격조건에서의 캡슐은 안전한 것으로 평가되었다.

시편을 바이스에 고정시켜 놓고 1 m 높이에서 1.4 kg의 강철 환봉을 시편에 최대 파손이 미치도록 낙하시키는 굽힘시험 결과 그림 9와 같이 시편의 굽힘면에서 변형각도 13° ~ 15°의 굽힘현상이 발생하였다. 하지만 법규에서 규정한 부수어지거나 흐트러진 현상은 발생치 않았으며, 시험 후 누설시험결과 bubble이 발생치 않아 굽힘조건에서의 캡슐은 안전한 것으로 평가되었다.

가열시험조건은 시편을 800°C로 가열하여 10분간 유지한 후 냉각시키는 조건이며, 가열시험 결과 시편의 외관이 고온으로 가열되어 시편 표면의 색상만이 은색에서 황동색으로 변화하였을 뿐 용융



Fig. 9. Source capsule after percussion test.

되거나 분산되지 않았고 누설시험 결과 bubble이 발생치 않아 가열조건에서 캡슐은 안전한 것으로 평가되었다.

### 안전성해석 평가

낙하조건에 대한 해석결과 운반캡슐은 캡의 하부 모서리 부분에서 국부적인 응력이 발생하며, 충돌면에서 튀어 오르고 회전하는 모습을 나타냈다. 그림 10은 9 m 자유낙하 충돌시 충돌 후 0.2 ms의 시간에서 발생하는 응력의 분포 및 변형된 모습을 나타내며, 캡 연결부에는 거의 응력이 발생하지 않았다. 운반캡슐의 최대응력은 캡슐을 담고 있는 캡의 충돌부위 셀 부위에서 최대 일차 막응력이 118.9 MPa, 최대 일차 막응력과 굽힘응력의 합이 335.1 MPa로서 허용한계 이내였으며, 내부에 담긴 캡슐에서는 최대 Von Mises 응력이 80.6 MPa로서 탄성한계를 넘지 않으므로 캡슐이 구조적 건전성을 유지함을 알 수 있다.

타격조건에 대한 해석결과 운반캡슐은 타격 환봉의 가격으로 인해 강도 및 경도가 낮은 납판 위에 몰입되게 된다. 그림 11은 타격조건 해석시 운반캡슐에 발생하는 응력의 분포 및 변형된 모습을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 타격시 캡의 선단과 연결부에 응력이 집중되고 캡의 셀 부분과 연결부에 국부적인 변형이 발생하지만 운반캡슐의 구조적 건전성에는 전혀 영향을 미치지 않는다.

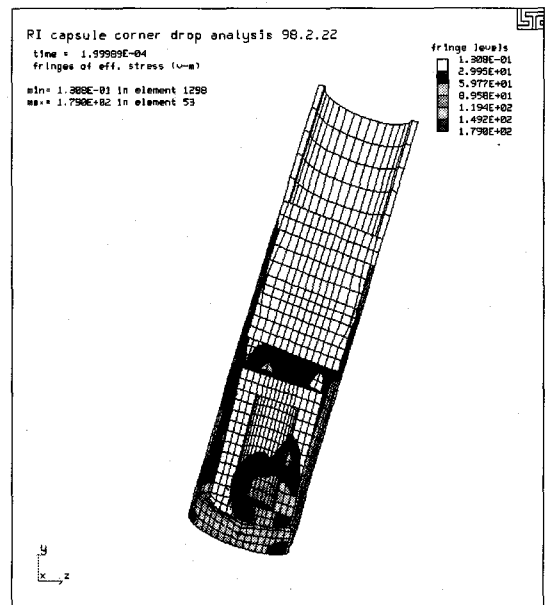


Fig. 10. Stress distribution and deformed shape under drop test condition.

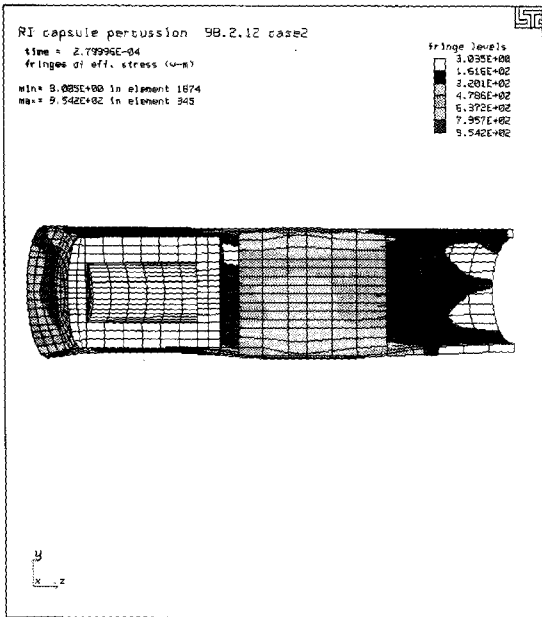


Fig. 11. Stress distribution and deformed shape under percussion test condition.

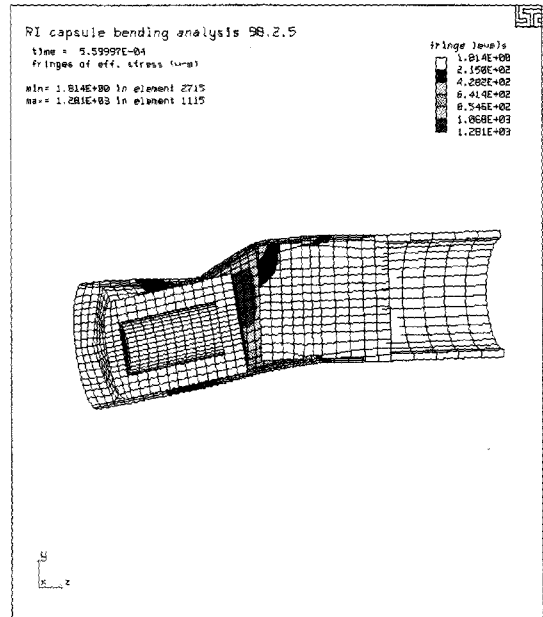


Fig. 12. Stress distribution and deformed shape under bending test condition.

이것은 캡이 스테인리스강인데 비해 바닥은 경도가 아주 작은 납판으로서 충격력을 납판의 변형으로 흡수하기 때문이다. 운반캡슐의 최대응력은 캡슐을 담고 있는 캡의 충돌부위의 캡 선단부위에서 최대 794.7 MPa의 Von Mises 응력이 발생하였고, 캡의 셸 부분에서는 캡 연결부위에서 최대 일차 막응력이 528.5 MPa, 최대 일차 막응력과 굽힘응력의 합이 701.5 MPa로 나타났다. 이들 응력은 모두 인장강도(tensile ultimate strength)를 넘지만 캡에 발생하는 응력이 압축응력이므로 캡을 파단시키지는 못할 것으로 판단된다. 한편, 캡 내부에 담긴 캡슐에서는 캡의 선단과 연결부분이 버티고 있어 캡슐은 충격력을 받지 않고 구조적 건전성을 유지함을 알 수 있다.

굽힘조건 해석결과 운반캡슐은 고정된 부분과 타격 환봉의 타격지점의 차이로 인해 캡 부분에 굽힘 모멘트를 발생시켜 캡 부분에 큰 변형과 응력을 발생시킨다. 그림 12는 수평상태의 굽힘조건 해석시 운반캡슐에 발생하는 응력의 분포 및 변형된 모습을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 굽힘 타격시 캡에 큰 변형이 생기지만 내부에 있는 캡슐에는 큰 응력이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 그리고 캡 연결부에 응력이 거의 발생하지 않는 것은 캡의 끝단부터 캡 연결부는 지그에 고정되어 충격력이 미치지 않기 때문이다. 운반캡슐의 최대응력은 캡슐을 담고 있는 캡의 충돌부위의 셸

부위에서 최대 일차 막응력이 1102.3 MPa, 최대 일차 막응력과 굽힘응력의 합이 1272.8 MPa로서 인장강도를 넘어서 파손이 발생할 것으로 예측되었다. 한편, 캡 내부에 담긴 캡슐에서는 최대 일차 막응력이 181.3 MPa, 일차 막응력과 굽힘응력의 합이 258.7 MPa로서 허용한계를 넘지 않으므로 캡슐이 구조적 건전성을 유지함을 알 수 있다.

가열조건에 대한 열전달해석을 수행하여 온도분포를 구하고 이 온도조건에 대한 열응력 그리고 압력해석을 수행하여 캡슐의 건전성을 평가하였다. 표 2는 운반용기 각 부위의 온도를 과도시간에 따라 나타내고 있다. 특수형 방사성물질 운반캡슐의 직경이 약 5 mm 정도로 매우 작아서 800 °C로 가열하면 온도가 급격히 상승하여 약 6분 후에 캡슐의 모든 부위 온도가 800 °C에 이르고 있음을 알 수 있다. 동위원소인 <sup>192</sup>Ir의 온도가 800 °C까지 상승하지만 Ir-192의 용융온도인 2,410 °C보다 훨씬 낮고 캡슐의 온도도 스테인레스강의 용융온도보다 낮으므로 열적 건전성이 충분히 유지될 것으로 판단된다.

가열조건에서 캡슐의 구조적 건전성 평가를 위하여 열응력해석을 수행하였다. 하중조건은 열전달해석에서 구한 온도분포를 열하중으로 고려하였고 보수적인 해석을 위하여 모든 부위의 온도를 800 °C로 고려하였다. 응력의 분류 및 평가기준은 ASME 코드에 의거 온도변화에 따른 2차응력

Table 2. Summary of maximum temperatures under heat test condition.

Location	Calculated temperatures (°C)									
	Initial	(0 < time < 10 minutes)					time > 10 minutes			
	0.0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Source( <sup>192</sup> Ir)	20	740	798	799	800	800	542	418	345	296
Source capsule	20	745	798	800	800	800	537	417	344	295
Source cap	20	771	799	800	800	800	508	416	344	295
Cap connector	20	768	799	800	800	800	519	397	330	284
Ambient temp.	20	800	800	800	800	800	38	38	38	38

Table 3. Summary of maximum stress under heat test condition.

Location	Calculated value(MPa)	Allowable value(MPa)	Temperature (°C)
Source capsule	7.8E-12	155	800
Source cap	2.1E-11	155	800
Cap connector	4.6E-12	155	800

(secondary stress)을 구하였으며, 표 3은 캡슐 각 부위에서의 열응력해석 결과를 나타내고 있다. 특수형 방사성물질 운반캡슐은 스테인레스강의 단일 물질로 구성되고 서로간에 구속됨이 거의 없이 자유롭게 거동하므로 열팽창으로 인한 영향은 무시할 수 있는 것으로 나타났다.

방사성물질 운반캡슐 내부는 공기로 채워지며, 열전달해석에서 계산된 내부공간의 온도를 기준으로 내부압력을 설정하고 이 압력에서 캡슐의 구조적 건전성을 평가하였다. 일반적으로 밀폐된 용기에서 공기의 온도상승으로 인한 내압은 Boyle-Charle의 법칙에 의하여 아래와 같은 식으로 정의된다.

$$P_1 \frac{V_1}{T_1} = P_2 \frac{V_2}{T_2}, \quad P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} \frac{V_1}{V_2}$$

여기서,  $T_1$  : Initial temperature (K)  
 $T_2$  : Final temperature (K)  
 $P_1$  : Internal pressure at temperature  $T_1$  (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $P_2$  : Internal pressure at temperature  $T_2$  (kg/cm<sup>2</sup>)

$V_1$  : Initial air space volume at  $T_1$  (cm<sup>3</sup>)

$V_2$  : Final air space volume (cm<sup>3</sup>)

초기 온도조건  $T_1$ 은 상온인 20 °C로 가정하였고 최종온도  $T_2$ 는 가열시험조건에서 캡슐의 내부공간의 온도이며, 내부공간 체적은  $V_1=V_2$  이다. 화재 사고조건하에서 캡슐의 내부공간의 온도는 800 °C 이고 이때 내압은 2.7 kg/cm<sup>2</sup>으로 계산되었다. 내부압력은 보수성을 고려하여 3.0 kg/cm<sup>2</sup>으로 설정하였으며, 이 압력은 캡슐의 내부공간을 보호하는 구조와 격납 건전성을 유지시키는 데 필요한 설계 기준압력이 된다. 내부압력 조건에 대한 응력은 실린더 형태의 막응력 계산식인  $\sigma = pr/t$ 의 식을 이용하여 계산할 수 있다. 앞에서 설정된 설계압력조건에 대한 응력해석 결과 선원 캡에서는 4.15 MPa, 그리고 캡슐에서는 0.64 MPa의 응력이 발생하는 것으로 계산되었다. 이들 응력 역시 허용치에 비하여 훨씬 낮기 때문에 내부압력으로 인한 캡슐의 구조적 건전성도 충분히 유지될 것으로 판단된다. 이상의 해석결과로 보아 가열시험조건에서 방사성물질 운반 캡슐은 열적 뿐만 아니라 구조적으로도 건전성이 충분히 유지될 것으로 판단된다.



## 결 론

특수형 방사성물질인  $^{192}\text{Ir}$  방사선원 운반캡슐에 대한 낙하, 타격, 굽힘조건에 대한 시험결과, 굽힘조건에 있어서만 외관상 변형이 발생하였을 뿐 별다른 손상이 발생하지 않았으며, 각각의 시험을 수행한 후 실시한 누설시험에서 어떠한 bubble도 발생하지 않았다. 해석결과에서는 대부분 캡 부분에서 국부적인 변형과 응력이 발생하였지만 내부에 있는 운반캡슐에는 큰 응력이 발생하지 않고 구조적 건전성을 유지하는 것으로 나타났다. 9 m 자유낙하 조건에 대한 해석에서는 캡의 응력 및 변형이 작게 나타나는 것은 운반캡슐의 충돌속도는  $13.3 \text{ ms}^{-1}$ 로 충돌속도는 크지만 자체의 중량이 약 3.4 g에 불과하여 1.4 kg의 중량을 갖는 타격 환봉에 의해 타격되는 굽힘시험이나 타격시험에 비해 하중조건이 훨씬 작기 때문이다. 가열조건에 대한 시험결과에서는 외관상의 캡슐 색이 은빛에서 황동색으로 변했을 뿐 어떠한 손상도 없었으며, 시험 후 수행한 누설시험에서 역시 bubble이 발생치 않았다. 열해석 결과에서 동위원소 선원 및 캡슐 등 모든 부위의 온도가  $800^\circ\text{C}$ 까지 상승하지만 선원 및 캡슐의 열적 건전성이 유지되고, 온도상승에 따른 열응력 및 압력해석 결과 구조적 건전성도 충분히 유지되는 것으로 나타났다. 따라서, 특수형 방사성 동위원소 운반캡슐은 별도의

승인된 운반용기에 캡슐을 장입할 경우 원자력연구소의 하나로에서 생산되는 동위원소를 안전하게 운반할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 중장기 연구의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 과학기술부, "방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정", 과학기술부 고시 제 96-38호, 1996.
2. IAEA Safety Standards Series No. ST-1, "Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material"(1996).
3. U.S. Code of Federal Regulations, "Packaging and Transportation of Radioactive Material", Title 10, Part 71(1997).
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).