

의료용 동위원소 운반용기 차폐체 주조 기술 개발 및 국산화

Development of Casting Technology and Localization for a Medical Radioisotope Transport Cask

이운상, 김희승, 장세정, 서기석, 김창규

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

국내에 전량 수입되고 있는 의료용 동위원소 운반용기를 국산화하기 위한 연구를 수행하였다. 감손우라늄 차폐체의 주조 방안을 수립하기 위해 응고해석 코드를 사용하여 적절한 압탕 지름, 용탕 온도 및 주형의 온도 구배 등의 조건을 결정하였다. 또한 실험을 통하여 적절한 Ti 안내관의 제작 방법을 설정하였다. 주조 결과 건전한 차폐체를 얻었으며, 방사능 차폐 성능 측정 결과 만족한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 의료용 동위원소 운반용기 국산화에 성공하였고, 수출도 할 수 있게 되었다.

Abstract

In order to localize the shielding casks for shipping medical isotopes, this research was carried out. The various casting factors such as the diameter of shielding casting, the temperature of melt and the temperature gradient of a mold were determined with the calculation results of solidification analysis computer code. Through the experiment, the manufacturing method of Ti core was developed to have no defects causing casting failure. As a results of casting experiment, depleted uranium shielding castings were successfully cast without any defect. Also as the results of the radiation shielding capability test, it was good enough to satisfied the standards of transport regulations.

1. 서론

방사성 동위원소를 운반하기 위해서는 인체에 해롭지 않도록 차폐재로 차폐를 하도록 법에 규정되어 있다.[1-3] 운반하기 위한 방사성물질과 그 포장의 종류는 방사성물질의 종류와 한계량에 따라, L형, IP형, A형, B형, C형, 핵분열성물질 운반물로 구분되어 있으며, 일반적으로 납, 텅스텐, 우라늄 등의 재료로 차폐 용기를 만들어 방사성 동위원소로부터 나오는 방사선을 차폐하고 있다. 높은 준위의 방사성 동위원소를 차폐시키기 위해서는 차폐효율이 좋은 우라늄을 사용한다. 감손우라늄을 사용하면 우라늄의 밀도가 높기 때문에 납 등에 비해 적은 체적으로 운반용기를 만들 수 있다. 감손우라늄은 텅스텐 등에 비해 구조성이 좋기 때문에 고효율의 운반용기는 감손우라늄을 사용하여 제작하고 있다.

본 연구에서는 식도, 폐기관지 등의 체강 부위에 존재하는 종양을 치료하기 위해 사용하는 원격 강내 조사 장치 (Remote After Loading System)의 선원인 Ir-192 10Ci를 2개를 담아 운반하여 하나로에서 병원에 공급할 수 있는 의료용 방사성 동위원소 운반 용기 중 감손우라늄 차폐체 구조 기술 개발에 대한 내용을 기술한다.

2. 운반용기 차폐체 형상

2 hole 의료용 방사성 동위원소 운반용기의 조립도는 그림 1과 같은 형상으로, ^{192}Ir 13.5 Ci의 밀봉선원 2개를 지름 9.5 mm의 티타늄 튜브를 곡률 55 mm를 갖도록 벤딩하여 U자 형태로 만든 안내관 안에 밀봉캡슐에 동위원소를 넣도록 설계하였다. 선원을 중심으로 일정한 두께의 감손우라늄을 감싸서 방사선량이 요구되는 허용치 이하가 되도록 계산하여 형상을 결정하였다. 감손우라늄 차폐체의 형상은 그림 2와 같으며, 폭 118 mm, 두께 90 mm 높이 157 mm로 되어 있다.

3. 차폐체 구조 방안

완전한 주물을 경제적으로 만들기 위해서는 구조에 영향을 미치는 여러 가지 요소를 분석한 뒤 가장 적절한 구조방법을 계획하게 된다. 구조방안의 내용으로는 원료의 품질, 용해에 관한 사항, 주형재료에 관한 사항, 조형에 관한 사항(주형제작), 주입에 관한 사항(주입온도, 주입속도, 주형의 상태), 다듬질에 관한 사항 등을 고려해야 하는데 현실적으로 구조방안을 설정함에 있어서 반드시 그 주물에 가장 적합한 각 요소를 자유로이 설정할 수가 없을 때가 많다. 일반적으로 구조방안이라는 것은 주입 용탕의 중량, 주입속도, 주입온도 등을 고려하여 탕구계를 설계하는 주형 설계를 의미하기도 한다. [4]

3.1 응고 수축율

주형을 설계하기 위해서는 수축율을 고려해서 만들고자 하는 최종 제품보다 크게

제작되어야 한다. 산업용 동위원소 운반용기의 구조실험에서 경험적으로 우라늄의 응고수축율은 약 2.2%로 나타났으며, 이를 의료용 운반용기에도 적용하였다.

3.2 용탕 중량 및 주입 속도의 결정

운반용기 차폐체는 약 10.7kg(U-0.2wt%Mo)에 해당되고, 압탕 부의 크기를 고려하여 약 16kg을 주입량으로 하였다. 이를 바탕으로 주입속도가 결정된다.

주입속도는 보통 주입에 소요되는 시간, 즉 주입시간으로 측정된다. 탕구단면이 일정할 경우 탕구 높이(H)가 높을수록 유속(V)이 빨라지고 주입시간(T)은 작아진다.

우라늄 16kg이 용해시 도가니 바닥으로부터 탕면까지 약 8cm 높이에 있게 된다. 이때 주입속도는 다음식에 의해 구해진다.

$$V = \mu\sqrt{2gH} = 0.4\sqrt{2 \times 980 \text{cm/sec}^2 \times 8 \text{cm}} = 50.1 \text{cm/sec}$$

노즐로 부터의 유출량 Q는 다음식에서 구해진다.

$$Q = V \times S \times \rho = 50.1 \text{cm/sec} \times \left(\frac{\pi \times (3 \text{cm})^2}{4} \right) \times 19 \text{g/cm}^3 = 6724 \text{g/sec}$$

주입시간 t는 다음식에서 약 2.4sec가 구해진다.

$$t = \frac{W}{Q} = \frac{16000 \text{g}}{6724 \text{g/sec}} \approx 2.4 \text{sec}$$

실제로 용탕은 브래킷이나, 분배기에 영향을 받아 이보다 시간이 더 소요되므로 이를 감안 하여 주입시간을 3sec로 정하였다.

3.3 압탕의 설계

압탕은 주입된 주형 내의 용탕에 정압을 부여하여 이것에 의해 정체하고 있는 가스나 용탕에서 발생하는 가스를 제거하는 동시에 용탕의 냉각 및 응고에 따라서 생기는 용탕의 수축에 대하여 용탕을 보급하는 것을 목적으로 한다. 압탕의 설계 조건으로는 압탕이 주물보다 나중에 응고되어야 하며, 압탕이 가지는 액상금속의 압력이 주물의 모든 부분에 골고루 미치는 위치에 설계되도록 해야 한다. 따라서 이 경우에는 압탕은 탕구와 겸용으로 직하 압탕(top riser)으로 하였고, 압탕의 용탕이 보온되어 지향성 응고가 일어나도록 하기 위해 Graphite를 가공하여 슬리브를 설치하였다.

3.4 주형설계

차폐 해석을 통해 얻어진 2 hole 의료용 방사선동위원소 운반용기 형상을 주물로

하여 Ti 튜브 안내관 및 압탕크기를 고려하여 그림 3과 같이 주형설계를 하였다. 주형가공은 차폐 해석에서 나온 형상을 IGS file로 변환하여 CNC Program에 작성하여 그림 4와 같이 CNC로 3차원 가공하였다.

4. 주조 해석 조건 및 결과

의료용 방사선 동위원소 차폐용기는 Z-CAST를 사용하여 유동-응고해석을 수행하였다. 용탕 온도는 1350 °C, 몰드의 온도 구배는 300°C, 450°C, 600°C로 설정하였으며, 압탕의 직경 변화에 따른 수축공 결함 발생 여부를 살펴보았다. 그림 5에서 압탕 직경이 커질수록 최종 응고지점은 주물내부에서 압탕쪽으로 이동함을 알 수 있으며 수축결함분석에서도 결함의 이동과 동일한 결과를 얻을 수 있었으며 압탕 직경이 70mm일때 건전한 주물 형상을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 주조 결과

유동-응고해석을 통해 실험조건을 확립한 후 주조 실험을 수행하여 의료용 방사선 동위원소 차폐용기를 그림 6과 같이 결함 없는 건전한 주물을 얻을 수 있었다.

6. 케이스 조립 및 방사선 차폐 성능 시험 결과

건전하게 주조된 감손우라늄을 우레탄폼으로 감싼 후 스테인레스강으로 제작된 케이스에 조립한 후(그림 7 참조), 방사선 차폐 성능 검사를 하였다. 시험 선원으로는 Ir-192 10 Ci를 두 개 장착한 후 표면의 선량을 측정하였다. 시험 결과 관계 법령 [1-3]에 따르면, 운반용기는 케이싱을 한 후 표면에서 측정하여 200 m rem/h 이하가 되어야 하는데, 최대 104 m rem/hr로(그림 8) 합격하였다.

7. 결론

감손우라늄 차폐체를 주조하기 위해, 주조방안을 수립하고, 주조 조건을 설정하기 위하여 주조 해석을 통해 최적의 주조 조건을 수립하였다. 또한 Ti 안내관의 제작 방법을 용접 부위가 없이 열간 가공으로 가공하여 주조 시 용탕이 누출되지 않도록 개선하였다. 이러한 주조 기술을 개발하여 결함이 건전한 주조물을 얻었다. 이 감손우라늄 차폐체를 케이싱한 후 방사선 차폐 성능 시험 결과 만족한 결과를 얻었으며, 따라서 이 연구를 통하여, 현재 전량 수입되고 있는 의료용 동위원소 운반용기를 국산화할 수 있었다.

감사의 글: 본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기사업의 일환으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] 과기부고시 제 96-38호, “방사성물질 등의 포장 및 운반에 관한 규정,” 1996.
- [2] IAEA, “IAEA Safety Standards Series No. ST-1 : Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material,” 1996.
- [3] US NRC, 10 CFR Part 71, “Packaging and Transportation of Radioactive Material,” 1989.
- [4] 김덕윤 편저, “주철주물의 구조방안”, 대광서림, 1997.

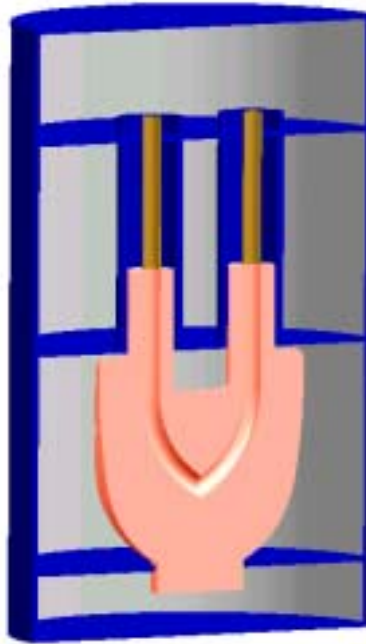


그림 1. 의료용 운반용기 차폐체 조립도

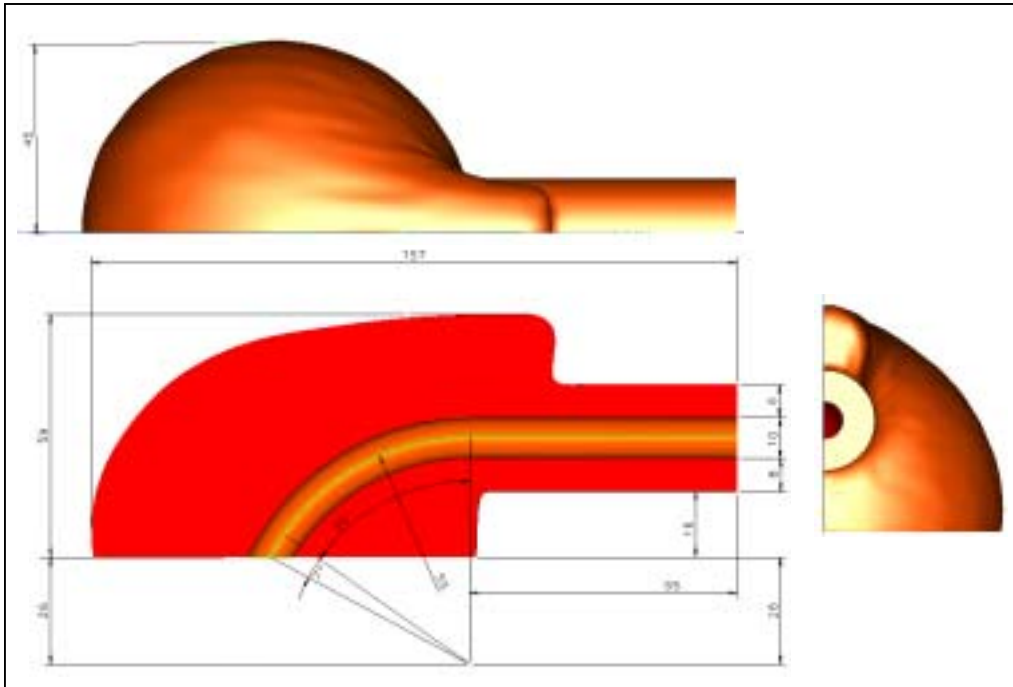


그림 2. 차폐체 형상

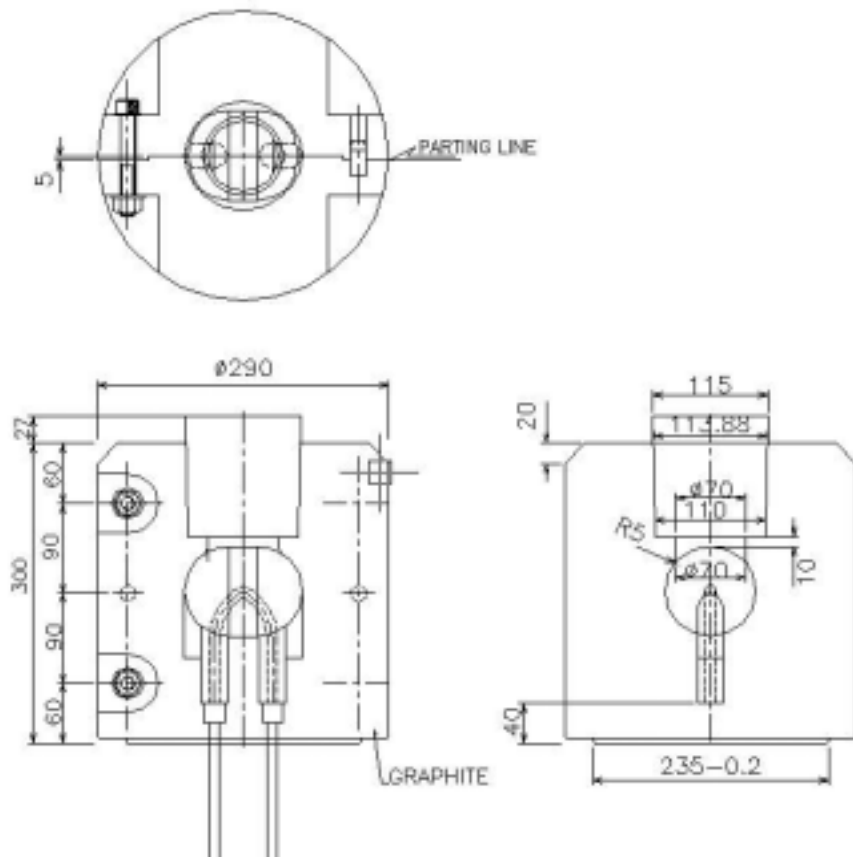


그림 3. 운반용기 주형 설계도



그림 4. CNC를 이용한 주형가공

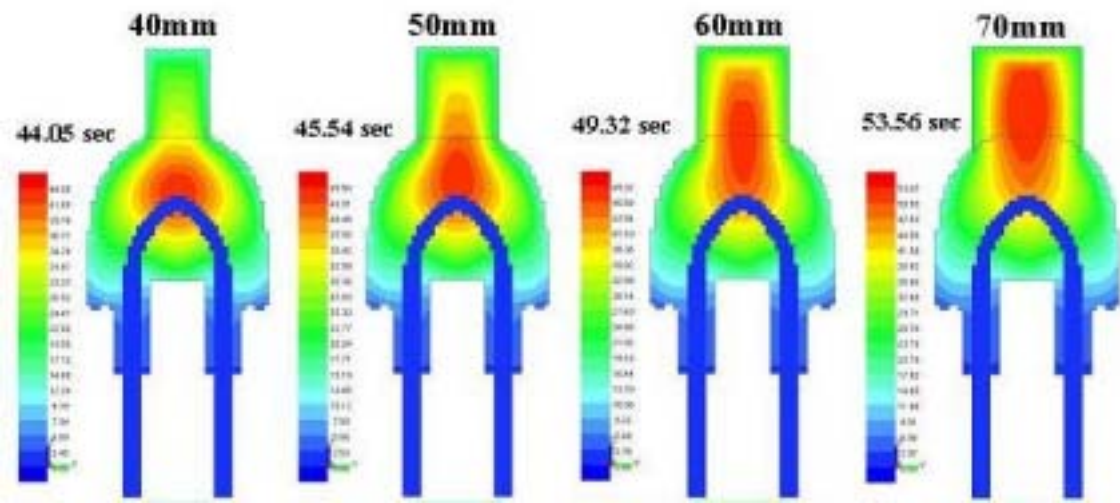


그림 5. 압탕 크기 변화에 따른 응고 시간



그림 6. 주조된 동위원소 운반용기



그림 7. 조립 완성된 차폐체 운반용기



그림 8. 시험 선원 Ir-192 10 Ci 2개를 이용한 방사선 차폐성능 시험 결과