

방사성 동위원소 운반용기 차폐재 주조 기술 개발

Development of Casting Technology for Radiation Shield of Radioactive Isotope
Shipping Container

이운상, 서기석, 박수봉, 김응수, 장세정, 김기환, 박종만, 김창규

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

방사선 투과 시험용 동위원소 운반용기의 차폐재는 차폐 성능이 우수한 감손우라늄을 사용하고 있다. 차폐재를 주조하기 위해, 주형을 설계 제작하였고, 주형의 재질, 노즐의 크기, 주형 예열 온도, S-tube의 재질 등 여러 변수를 고려하여 결함이 없는 차폐재를 주조하도록 하였다. 그 결과 주형 예열 온도가 중요한 변수임을 알 수 있었다. 또한 S-tube의 재질은 우라늄과 S-tube가 반응하지 않는 Ti tube를 사용하는 것이 유리함을 알 수 있었다. 실험결과 최적의 주조 방안이 도출되어, 결함이 없는 차폐재를 주조하는데 성공하였다.

Abstract

The shielding material of a shipping container for Gamma-ray radiography is usually used as depleted uranium having a good shielding efficiency. Casting mold was designed and fabricated. Considering the following factors which are the material of the casting mold, the size of the nozzle, the preheating temperature of the mold and the material of the S-tube, the experiments was conducted to get the optimum condition without defects. From the results of the experiments, the preheating temperature of the mold was shown to be important variable. The material of S-tube was selected as Ti tube in the interaction point of view. The radiation shields could be produced successfully using optimum variables obtained through experiments.

1. 서론

산업체에서 압력용기나 용접 부위의 안전성을 검사하기 위해 비파괴검사 방법의 하나인 방사선 투과시험을 사용하는데, 이 때 사용되는 방사성 동위원소 운반 용기의 주요 구성품은 방사선원의 봉인 Capsule Assembly와 마개 장치가 있으며, 이를 감싸는 감마선 차폐재, 그 외관에 절연재 및 충격 완충재가 있다. 충격완충재 바깥쪽은 직육면체 형상으로 쉘 및 측면판이 있다. 측면판에는 방사선원을 안전하게 사용하거나 운반하기 위한 잠금장치와 마개가 있다. 이 운반 용기는 방사성 동위원소인 Ir-192(120 Ci), Co-60, Cs-137, Tm-170 등을 선원으로 사용할 수 있는 용기이다. 이러한 운반 용기는 현재 전량 수입되고 있다. 따라서 이 운반용기를 국산화하기 위하여, 운반 용기를 개발하고 있는데, 본 논문에서는 이 운반 용기의 주요 구성품 중 감마선 차폐재의 구조 방법에 관한 것을 기술하려 한다.

2. 감마선 차폐재(Gamma-ray Shield)와 내부관(S-tube)의 사양

감마선 차폐재는 직경 100 mm 구형 형상과 S자 형태의 내부관을 최소 두께 8 mm 이상의 차폐재로 에워 쌓여 있는 형상으로 총 직선 길이는 216 mm이다. 내부관은 봉인 선원 Assembly가 이동할 수 있는 통로로서, S자 형상의 Seamless tube이다. 내부관의 Tube는 원점 대칭 형상으로서, 그 한쪽의 Tube 중심선은 반경 88 mm, 각도 약 59.2도의 원호를 가지며, 직선 부위는 약 49.5 mm이다. 내부관의 직선 부위에 대한 평행선 거리는 86 mm이며, 외경 138 mm 두께 20 mm이고, 총 직선 길이는 약 250 mm이다. 감마선 차폐재의 내부관 통로 끝 부분은 Sleeve 형식의 Tube가 있으며, 그 크기는 길이 20 mm, 외경 160 mm, 두께 1 mm이다. 이와 같은 차폐재의 설계도면은 그림 1과 같다.

3. 차폐재 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 용량의 증량, 주입속도, 주입온도 등을 고려하여 탕구계를 설계하는 주형 설계를 의미하기도 한다. [1]

3.1 주형 설계

3.1.1 응고 수축율

주형을 설계하기 위해서는 수축율을 고려해서 만들고자 하는 최종 제품보다 크게 제작되어야 한다. 그 동안의 경험에 의해 우리나라의 응고수축율은 약 2%로 적용하였다.

3.1.2 주입 용탕 중량 및 주입 시간의 결정

그림 1의 체적은 약 740 cc로서 우리나라 약 14 kg에 해당된다. 압탕 부의 크기를 고려하여 대략 20 kg을 주입량으로 하였다. 적절한 주입시간이 정해지면 용탕의 유속을 고려하여 탕구 계통 각부의 크기가 결정된다. H.W.Dietert를 비롯해서 주입시간을 계산하는 여러 식이 발표되어 있으나 완벽하게 주입시간을 계산할 수 있는 계산식은 없다. 그러나 다음과 같은 H.W.Dietert 식을 사용하여 주입시간을 계산하였다.

$$T = S\sqrt{W}$$

T: 주입시간[s]

S: 살두께에 따라서 정해지는 계수

W: 주입용탕 중량[kg]

살두께 8.2 ~ 15.6 mm 일 때 S=2.24

위 식에 의해 계산하면 주입시간은 약 10초 이내에 이루어져야 한다.

3.1.3 노즐의 크기

위에서 계산한 주입시간 내에 용탕을 주입하기 위해, 노즐의 지름을 약 25 mm 정도로 하였으나, 실험을 통하여 35 mm로 정하였다.

3.1.4 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 응고가 되어야 하며, 압탕이 가지는 역상금속의 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. 압탕의 크기는 지름 82 mm, 높이 130 mm로 하였다.

3.2 유한차분법에 의한 응고 거동 계산

위에서 설계한 압탕과 주형에 대해 주물에 발생할 수 있는 수축공 등의 결함 발생 여부를 확인하기 위해, 유한차분법(FDM)을 적용한 3차원 컴퓨터 Simulation software인 CAST Designer를 사용하여 시간에 따른 응고 진행 상태를 계산하여, 결함이 발생할 수 있는 부위를 확인하여 보았다. 이 때 Mesh 수는 87 만개로 나누었으며, 그림 2는 80 초 후의 주물의 응고 상태를 나타내는 그림이다. 이 때 주형의 온도는 동일하다고 가정하여 계산하였으며, 수축공이 압탕 하부에 발생할 수 있기 때문에, 실제 주조시에는 수축공이 압탕 상부에 발생하도록 하기 위해, 즉 지향성 응고가 되도록 하기 위해 온도 구배를 주었다.

4. 주형 및 S-tube 제작

4.1 주형 제작

주형의 재료는 내열합금 주철 또는 Graphite를 사용하였고, 주형의 크기는 직경 290 mm, 높이 300 mm 상하 분리형으로 설계하였다. 상형에는 탕구 및 압탕의 역할을 하도록 압탕의 크기를 지름 82 mm, 높이 130 mm로 하였으며, 이 압탕 부위를 보온하기 위하여 두께 10 mm 흑연 Sleeve를 사용하였다. 주형의 가공은 우라늄 금속의 수축율을 약 2 %로 적용하여, 만들고자 하는 차폐재 크기보다 2 % 크게 설계하여 CNC로 가공하여 제작하였다. (그림 3)

4.2 S-tube 제작

S-tube의 재질은 Stainless 및 Ti Tube를 사용하였다. Tube를 S자 형태로 Bending하기 위해 Bending Jig를 제작하여 Bending하였다. Stainless Tube의 경우에는 우라늄 용탕과 반응하는 것을 막기 위해 Calorizing 처리를 하여 Al 피막을 입히거나, 또는 Plasma Coating 방법을 사용하여 Zircon 피막을 입혀 사용하였다.

5. 우라늄금속의 용해 방법 및 용해 조립도

우라늄은 산화성이 강하여, 공기 중에서 용해 주조가 불가능하며, 용탕 내의 수소, 산소, 질소 등 용존 기체를 제거하기 위하여 진공 탈가스 방법이 필요하므로, 진공 유도 용해 방법이 일반적으로 사용된다. 따라서 우라늄 용해시에는 10^{-3} torr의 진공도를 유지시키면서, 주파수 3 kHz의 고주파 유도로를 사용한다.(그림 4) 진공 유도 용해 주조의 특징은 온도 조절이 용이하고, 유도 전류에 의한 교반 작용이 있으며, 또한 우라늄은 산화성이 높기 때문에 진공 용해 방법을 사용하나, 과도한 진공도($10^{-4} \sim 10^{-5}$ torr)를 사용하면 불순물이 상부에 편석하게 되며, 낮은 진공도에서는 산화되어 불순물 발생이 많아지기 때문에 실험을 통하여 최적의 진공도($10^{-2} \sim 10^{-3}$ torr)를 적용해야 한다. 용해온도는 약 1350°C로 설정하였으며, 도가니의 재질은 Graphite를 가공하여 사용하였으며, 도가니 내부에 수용성 고내화성의 도형재

인 Holcote 110(주성분 Zircon)을 Coating한 후 건조하여 사용하였다.[2]

6. 차폐재 주조 및 주조 결과 고찰

6.1 차폐재 주조 방법

차폐재를 주조하기 위해 진공유도로에 그림 5와 같이, 도가니, 노즐, 안내관(탕구 역할), 압탕 및 주형을 설치하고, 감손우라늄과 2 wt%Mo을 도가니에 장입하고, 1350°C로 용해를 하였다. 주형의 온도를 관찰하기 위해 주형의 상, 중, 하에 열전대를 설치하였다. 처음에 설계한 주조 방안에 따른 주조가 실패하였기 때문에, 일반적으로 주조 시 고려해야 할 사항인 출탕 온도, 출탕 속도, 주형 예열 온도, 주형 도포재, 주형의 재질, S-tube의 재질, 탕구 등 모든 가능한 변수를 조사하였고, 4번의 개선 끝에 성공적으로 주조할 수 있었다. 주조된 차폐재 주물에 대해서는 육안으로 표면에 발생한 기공 등을 관찰하였으며, 내부의 결함 존재 여부를 확인하기 위해 하나로의 증성자 투과 시험 장치를 사용하여 비파괴검사를 수행하였다. 표 1은 각 차수에 따른 주조 조건을 나타낸다.

표 1. 차수별 주조 조건

차수	주형재질	S-tube 재질	주형 예열 온도			기타 개선사항	결과
			상	중	하		
1	주철	S,S (Al 피막)	440	244	175	노즐: 25 mm	S-tube 녹음 불량
2	주철	S,S (Zircon Plasma 피막)	278	92	83	노즐: 35 mm 분배기 설치	불량
3	주철	Ti	642	233	193		상형 양호 하형 불량
4	주철	Ti	646	471	439		작은기공
5	흑연	Ti	764	454	418		양호
6	흑연	Ti	812	470	434		양호
7	주철	Ti	619	500	483		양호

6.2 주조 결과 및 주조방안에 대한 고찰

1차 실험에서는 일반적으로 금형 주조에서 사용되는 금형 예열 온도인 용해온도에서 1000°C를 뺀 350°C를 목표로 가열하기 위해 진공유도로의 1차 코일만을 사용

하여 서서히 승온하였다. 그러나 주형의 온도는 표 1과 같이 주형의 가운데 부분이 240°C로 원하는 온도까지 가열되지 않았다. 또한 분배기 없이 출탕하여 S-tube의 Alumina 피복층이 손상을 입으면서, Stainless tube가 우라늄과 반응하여 녹아버렸다. 이 때 발생한 가스로 큰 기공들이 발생하였으며, 용탕이 흐른 흔적 등이 남아 있었다. 주물 표면은 거칠었으며, 이것으로 보아 주조 금형 온도가 낮고, 주입 용탕의 온도가 낮아서 용탕의 유동성이 좋지 않은 것으로 판단하였다.

따라서 1차 주조 결과 개선점은 다음과 같다.

- 1) S-tube의 용해를 방지하기 위해, S-tube를 보호하기 위한 분배기를 설치하고, Stainless steel tube에 Alumina 피복층 대신 Plasma Coating 방법으로 Zircon을 피복하였으며, S-tube의 입력저항을 높이기 위해 내부에 지르코니아 분말을 충전하였다.
- 2) 가스가 많이 발생하였으므로, 지금까지 사용해오던 수용성 도포재(Holcote)를 알콜성 도포재(Ceramol)로 대체
- 3) 주입시간을 짧게 하여 주입 용탕의 온도를 높이기 위해 노즐의 크기를 25 mm에서 35 mm 확대

2차 시험에서는 위와 같이 문제점을 수정하였으나, 주형의 예열 온도를 높이는데 실패하였다. 주조 결과 S-tube는 용해되지 않았으나, 알콜성 도포재의 도포 효과가 Holcote에 비해 좋지 않아, 도포재가 벗겨지면서 우라늄이 주철 주형에 용착하였으며, 가스가 발생하여 주물의 표면에 기공이 발생하였다. 2차 시험 결과 알콜성 도포재는 결합력이 너무 약하여 박리가 잘 되므로, 우라늄의 용해에는 부적합한 것으로 판단되었다.

3차 시험에서는 주형의 예열 온도를 올리기 위해, 주형 지지대를 높여 주형이 가능하면 1차 코일에 근접하도록 하였고, S-tube의 재료를 티타늄으로 하여 S-tube를 새로 제작하여 사용하였고, 도포재로 다시 Holcote 110을 사용하였다. 주형의 예열 온도를 최대한 올렸으나, 상부 주형의 온도는 높았으나, 하부 주형의 온도는 233°C였다. 주조 결과 상부 주물은 상태가 좋았으나, 하부에서는 기공들이 발생하였다.

3차까지의 시험 결과, 주조의 성패는 주형의 예열 온도에 달려 있음을 알게 되었다. 즉 주형 표면에 주형을 보호하고, 우라늄과 반응하는 것을 막기 위해 도포해야 하는데, 이 도포재에서 발생하는 가스를 완전히 제거해야만, 주물의 표면에 기공이 발생하는 것을 막을 수 있다. 따라서 주형을 적어도 400 °C 이상으로 가열해야 이 가스를 제거할 수 있을 것으로 판단하였다. 따라서 지금까지 사용하지 않았던 주형 예열 코일인 2차 코일을 사용하여 온도를 높이기로 하였다.

4차에서 7차 시험 시 주형의 예열 온도는 상부 600°C 이상, 중부는 450°C 이상, 하부는 400°C 이상으로 예열되어, 이상적인 지향성 응고가 이루어지도록 되었다. 4차

시험에서는 2차 시험시 용착된 주철 금형을 보수하여 사용하였기 때문에 아래 부분에 작은 기공이 발생하였다. 5차에서는 주형 재질을 주철 금형 대신 Graphite 주형을 새로 제작하여 사용하였으며, 7차에서는 주철 주형을 사용하여 견전한 주물을 주조하였고, 증성자 투과시험을 통하여 결함이 없음을 확인하였다. 또한 주물의 응고 수축율을 고려한 주형을 사용하여 원하는 치수의 주물이 주조되었음을 확인하였다. (그림 6)

8. 결론

- 1) 방사선 투과 시험용 동위 원소 운반 용기의 차폐재를 개발하기 위해, 여러 가지 주조 방안을 고려하여 주형을 설계 제작하고, 용해조건, 주형 예열 온도, S-tube의 재질, 주형 재질, 주형 크기 등 여러 변수를 시험하여 최적의 주조 방안을 도출하였고, 원하는 치수대로 결함이 없는 차폐재가 성공적으로 주조되었다.
- 2) 주형의 도포재에서 발생하는 가스를 제거하기 위해, 주형 하부 예열 온도는 400 °C 이상 그리고, 지향성 응고가 되도록 주형 상부 온도는 이보다 최소 100 °C 이상 높아야 된다.
- 3) 주형의 S-tube의 재질은 우라늄과 반응하지 않는 Ti를 사용해야 한다.
- 4) 노즐의 크기, 분배기, 용탕의 온도 등은 잘 선택된 것으로 판단된다.

이 연구를 통하여, 현재 전량 수입되고 있는 방사선 투과시험용 방사성 동위원소 운반 용기를 국산화할 수 있다.

참고 문헌

- [1] 김덕윤 편저, "주철주물의 주조방안", 대광서림, 1997.
- [2] 서인석 외, "방사선 차폐재료 개발", 1997, KAERI/RR-598/87, pp 269-377.

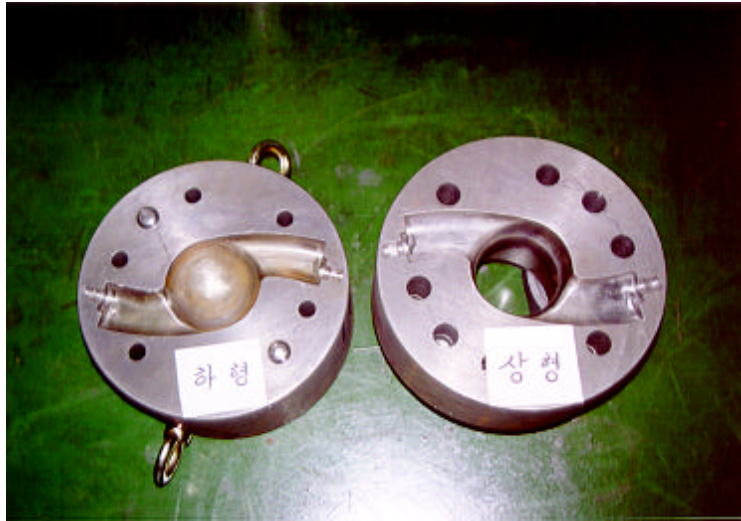


그림 3. 차폐재 주조 주형

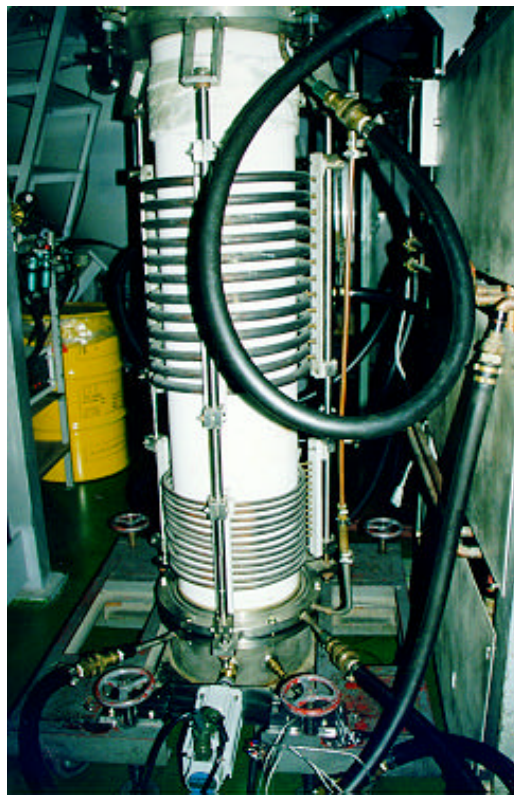
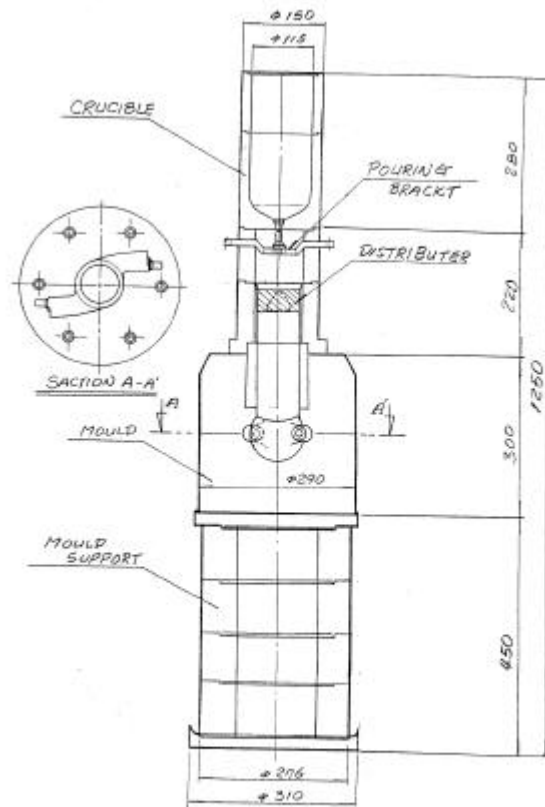


그림 4. 고주파 유도로 용해 장치



차폐재 용해 조립도 (S=1/5)

그림 5. 차폐재 용해 조립도



그림 6. 주조된 차폐재