

방향성응고장치를 이용한 사용후 핵연료 금속저장봉 주조기술 개발

Development of Casting Technology for Manufacturing Metal Rods with
Simulated Metallic Spent Fuels

이훈배, 이윤상, 우윤명, 장세정, 김정도, 김창규, 신영준
한국원자력연구소

이 종 현
충남대학교

요 약

직경 13.5 mm 길이 1200 mm의 사용후 핵연료 저장 금속봉을 주조하기 위하여 새로운 개념의 방향성응고장치를 개발하였다. 가늘고 긴 주형에서 발생하기 쉬운 수축공을 방지하기 위하여 주형을 4부위로 나누어 각각 온도를 제어 할 수 있는 주형 예열장치를 갖는 진공 용해 주조로를 설계 제작하였다. 이 장치를 사용하여 주형의 4부위에 온도구배를 주어 수축공이 없는 주조봉을 성공적으로 주조하였다. 또한 응고해석을 하기 위하여 상용 응고해석 프로그램인 Magma를 사용하여 수축공이 발생할 수 있는 위치 및 용탕의 응고 거동을 해석하였다.

Abstract

The advanced casting equipment based on the directional solidification method was developed for manufacturing the uranium metal rod having 13.5 mm diameter and 1,200 mm length.

In order to prevent surface-shrunk holes revealed easily in course of casting the small diameter and long rods, the vacuum casting furnace has the four pre-heaters equipped with temperature controller. On the other hand, the computer simulation to estimate the defective location and to analyze the solidus behavior of molten uranium in the mold were also performed by using MAGMA Code. As a result of the experimental and theoretical study, the sound rod has successfully been manufactured.

1. 서론

사용후 핵연료를 경제적으로 저장하고 향후 재활용하거나 직접 처분하기가 용이하다는 장점 때문에 원자력 선진국에서는 습식저장 방법과 함께 건식 저장방법을 채택하고 있으며 우리 나라에서도 PWR 사용후 핵연료의 건식저장 방법에 대한 연구가 진행되고 있다[1]. 현재 연구되고 있는 공정개발은 사용후 핵연료를 Li금속을 이용하여 우라늄 금속으로 환원시킨 후 이것을 긴 봉 형태로 주조하여 캐니스터에 저장하는 공정이다. 이 저장 금속봉은 직경 약 13.5mm 길이 3.8m로 설계 되어 있으며 이 우라늄 금속봉을 캐니스터에 일정한 간격으로 넣기 위해서는 성형된 봉의 진원도 및 진직도가 정밀해야 하며 건전성을 유지하기 위하여 내부에 크랙, 기공 등의 결함이 없어야 한다[2].

우라늄을 용해 하는 방법은 우라늄은 산화성이 강하여 대기 중에서 용해주조가 불가능하며 용탕중에 존재하는 수소, 산소, 질소 등의 기체를 제거 하기 위하여 진공 탈가스가 가능한 진공 유도 용해 방법이 일반적으로 사용된다. 또한 유도 가열 방식은 용탕의 교반 작용에 의해 용해 속도를 증가 시키고 상하 편석이 적은 건전한 주괴를 얻는데 효과적이다.

본 연구에서는 가늘고 긴 우라늄 금속봉을 기공, 수축공 등의 결함이 없이 주조 하기 위해서 4부위로 나누어 각각 온도 조절이 가능한 주형 예열장치를 설계 제작 하여 주형에 온도 구배를 주어 응고 가스 및 수축공이 상부로 이동할 수 있도록 새로운 개념의 주조 장치를 설계 제작하였고, 응고 해석 및 실제 주조 실험을 통하여 최적의 주조 조건을 도출하기 위한 실험을 수행하였다.

2. 방향성응고 주조장치의 설계 제작

2-1 용해 장치 및 도가니

사용후 핵연료 저장금속봉을 주조하기 위하여 우라늄 주괴를 용해 하는 방법은 일반적으로 많이 사용되는 진공 유도가열 방법을 채택하였다. 우라늄이 용해되는 동안 10^{-3} torr 이하의 진공을 유지 할 수 있도록 진공 system을 제작하였다. 용해로의 진공 챔버는 스테인레스(SUS304) 강판을 사용하여 2중 구조의 원통형으로 제작 하였고 바깥 원통과 안쪽 원통 사이에는 냉각수가 순환되도록 하였다. 크기는 가열 코일로부터 내벽에 유도전류의 영향이 미치지 않는 거리와 작업공간을 고려하여 챔버의 내경을 500mm로 제작하였다. 유도 코일은 Cu 관을 사용하여 제작하고 관의 내부에는 냉각수가 흐르도록 하였다. 코일의 turn 수는 7 turn으로 하고 도가니 아랫 부분에 에너지가 집중되도록 하부쪽 코일 간격을 상부쪽 보다 좁게 하였으며 용탕의 최고 가열온도는 1500°C까지 가능하도록 하였다. 발전기는 우라늄 50kg/bat 용량을 기준으로 최대 출력 75kw, 주파수 3kHz의 크기로 제작 하였다. 도가니 재

료는 G-330 급 흑연을 사용하고 용탕과의 반응으로 탄소가 혼입되는 것을 방지하기 위하여 ZrO_2 가 주성분인 holcote#110을 내부에 도포하여 사용하도록 하였다.

2-2 주조 장치

2-2-1 용탕 주입 장치

우라늄 주괴(ingot)를 주조 할 때 출탕하는 방법은 주로 bottom-pour 방식으로 도가니 바닥의 출탕구를 막고 있는 plug를 제거하여 용탕이 자중에 의하여 주형 속으로 쏟아 부어지도록 하는 방법을 사용하여 왔다. 이 방법은 pouring rod가 도가니 내부에 위치해야 하기 때문에 원료를 도가니에 장입 하는 것도 불편 할 뿐만 아니라 우라늄 용탕과 반응을 피하기 위하여 도포(coating)를 해야 하며 작업 후에 pouring rod에 우라늄 용탕이 묻기 때문에 재사용 하기 위해서는 이것을 모두 제거해야 한다. 따라서 방사성 폐기물도 증가하게된다. 이러한 불편을 줄이기 위하여 출탕 방법을 달리 설계 제작 하였다. 즉 도가니의 하단부에 도가니 재료와 동일한 흑연으로 가공한 노즐 가이드를 부착하도록 하고 출탕구와 노즐 가이드 사이에 노즐을 삽입하여 공압으로 작동하는 push rod로 노즐을 밀어 도가니의 출탕구 구멍과 노즐 구멍의 중심을 일치시키는 방법을 고안하여 사용 하였다(그림 1). 노즐은 ZrO_2 가 주성분인 세라믹 소결체를 사용하여 제작하였다. 이 경우 노즐이 원활하게 작동하면서도 노즐 상부 면과 도가니 출탕구 사이의 틈새를 통하여 용탕이 스며 나오지 않도록 노즐과 노즐 가이드의 clearance를 0.1mm 로 정하였다.

2-2-2 주형 가열 장치

사용후 핵연료 저장 금속봉의 설계 길이는 3.8m 이지만 본 장치는 1.2m를 기준으로 제작하였다. 주조 해야할 제품이 비교적 길이가 길고 가는 봉형이기 때문에 용탕이 응고하기 전에 출탕을 완료하기 위해서는 주형을 예열 해야만 한다. 우라늄의 응고 온도가 $1130^{\circ}C$ 이므로 출탕할 때 주형의 어떤 부위에서든 이 온도 이상을 유지할 수 있고 또한 응고하는 동안 발생 할 수 있는 개스를 주형 상부로 부상 시키기 위하여 하부에서 상부로 응고가 진행될 수 있도록 온도제어가 가능한 가열장치를 제작 하고자 하였다. 따라서 heating element zone을 4개로 하고 각 heating element의 온도 조정은 P.I.D 제어방식을 채택하였으며 4개의 온도제어기 간에 신호를 주고받을 수 있도록 하였다.

또한 기존에 사용하던 세라믹 단열재와 비교하여 분진등의 환경오염이 없고 $700^{\circ}C$ 이상으로 열선이 가열될 경우 내부 투시가 가능한 금경(gold mirror)을 단열재로 사용하였다.

3. 저장 금속봉의 시험 주조 및 결과

저장 금속봉 주조 실험에 사용한 우라늄 원료는 미국에서 수입한 감손 우라늄 주괴(ingot)를 적당한 크기로 절단(sawing)하여 사용하였다. 표피의 우라늄 산화물,

절삭유등의 이물질 제거하기 위하여 40%질산용액으로 세척한 후 건조 시켜서 도가니에 장입 하였으며 장입량은 3.3kg으로 하였다. 도가니의 내부에는 hocote#110을 약 0.1mm 두께로 도포(coating)하였다. 용탕 노즐의 직경은 5mm를 사용하였다. 주형은 내경 14mm의 석영 주형을 사용하였으며 주형이 손상될 경우를 대비하여 두께 5mm의 흑연 보호관속에 주형을 설치하였다.

용해 사이클은 5 kW/의 출력으로 20분간 가열한 후 10kW/24kHz로 출력을 높여서 20분간 가열하고 다시 12kW/25kHz의 출력으로 10분 동안 가열하여 용탕 온도가 1400°C까지 도달한 뒤 3분간 유지하여 출탕하였다. 용해가 시작되어 출탕이 완료 될 때까지 진공도는 2.5×10^{-3} torr를 유지하였다.

주형의 예열 온도는 하부 heating element로부터 1000°C(No1), 1030°C(No2), 1070°C(No3), 1120°C(No4)로 설정하고 출탕 후 각 heating element의 설정온도에서 -1°C가 되었을 때 냉각 스텝으로 진행하도록 프로그래밍 하여 4개의 zone이 거의 동시에 냉각이 시작되도록 하였다.

그림 3은 본 연구에서 제작한 주조장치를 이용해 주조한 금속우라늄 봉의 사진이다. 육안 관찰한 주조봉의 표면은 기포, 수축공 등의 결함이 없는 양호한 상태이며 주조봉의 직경은 13.7mm, 길이는 약 1150mm이다.

4. 응고해석

주조공정의 유동 및 열전달 해석을 위하여 상용 FVM코드(Magma soft)를 사용하였다. 주물의 응고과정중에 온도구배를 모사하기 위하여 주형을 4부분으로 구분한 후 각각 상부로부터 1120°C, 1070°C, 1030°C 및 1000°C의 초기온도를 설정하였다. 주물의 응고속도는 직접 측정할 수 없어, 주형의 온도변화로부터 간접적으로 예측하기 위하여 상부로부터 175mm, 520mm, 870mm 및 1220mm지점의 흑연 몰드에 4개의 열전대를 설치하였다. 주형의 온도로부터 주물의 실제 온도를 예측하기 위해서는 주형과 주물사이의 열전달계수에 대한 정확한 자료가 필요하며 각 부분별 열전달계수를 그림 4에 나타내었다. 여기서 h_{c-q} 는 주물과 석영관사이의 열전달계수, h_{q-g} 는 석영관과 흑연몰드 사이의 열전달계수, h_{g-f} 는 흑연 몰드와 로 사이의 열전달계수, h_{r-q} 는 로와 석영관 사이의 열전달계수, h_a 는 대기와의 열전달계수로서 각각 $2000W/m^2K$, $1000W/m^2K$, $500W/m^2K$, $500W/m^2K$ 및 $500W/m^2K$ 로 설정하였다. 초기 용탕 온도를 1400°C로 설정한 후 완전 충전에 걸리는 시간은 총 17초 였으며 냉각 곡선은 그림 5에 나타내었다. 주형에서 측정된 냉각 곡선은 계산값과 잘 일치하였으며, 이로부터 용탕의 응고시간을 계산하였다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 응고시간은 주형의 하단부와 주입구 주위에서 가장 빨랐으며 이는 주형의 불균일 예열온도에 의해 예열온도가 가장 낮은 하단부에서 빠른 응고가 일어난 것으로 판단되며 하단부의 수냉장치에 의하여 응고시간은 더욱 빨라졌을것으로 보인다. 응고시간은 주형의 하단부로부터 700~1050mm지점에서 가장 느린 경향을 보였다. 이를 통하여

주형의 하단부로부터 상부로 온도구배 조절이 성공적으로 이루어졌음을 알 수 있고 수축공의 발생이 주물의 상부로 유도될 가능성을 시사한다. 충전성에 대하여 체계적으로 관찰한 Niyama[3,4] 등의 보고에 의하면 박육부를 지닌 주물의 경우 수축공의 형성은 용탕의 점도와 응고속도에 가장 큰 영향을 받으며 본 연구와 같은 큰 Aspect ratio의 형상일 경우 균일 응고가 일어날 경우 중심부의 점도 감소로 하단부의 수축공을 보충할 용탕의 충분한 공급이 이루어지지 않아 하부쪽으로 결함이 발생할 가능성이 크다. 따라서 본 시스템의 계산결과 온도구배의 조절에 의하여 수축공을 상부로 유도하여 건전한 주물을 얻을 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

- 1) 온도구배를 갖는 주형 가열장치를 사용해서 길이 1150mm, 직경 13.7mm의 수축공이 없는 우라늄 저장금속봉을 성공적으로 주조하였다.
- 2) 응고 해석 결과 주형 하부에서 상부로 응고가 이루어지도록 하기 위한 온도 설정이 성공적으로 이루어졌음을 확인 할 수 있었다.
- 3) 기존의 출탕장치를 개선하기 위한 판상형 지르코니아 노즐이 성공적으로 사용되었다.

6. 참고문헌

- 1) 노성기 외 "사용후 핵연료 저장기술개발" KAERI-NEMAC/RR-166/96
- 2) 이윤상 외 "사용후 핵연료 금속저장봉의 주조 방안 연구" 98추계학술 발표회 논문집, 한국원자력학회
- 3) S.Hiratsuka, E. Niyama, K.Anzai and H. Horie, Proceedings of the 3rd Pacific Rim International Conference on Modelling of Casting and Solidification Processes, Beijing, China (1996) 130
- 4) E. Niyama, K. Anzai, T. Funakubo and S. Hiratsuka, J. Mater. Proc. Tech., 63 (1997) 779

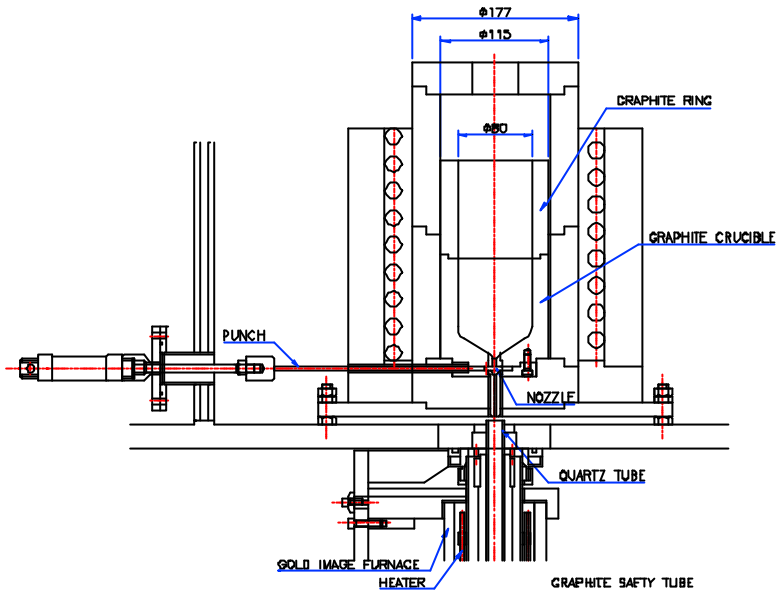


Fig. 2 Schematic diagram of new pouring system

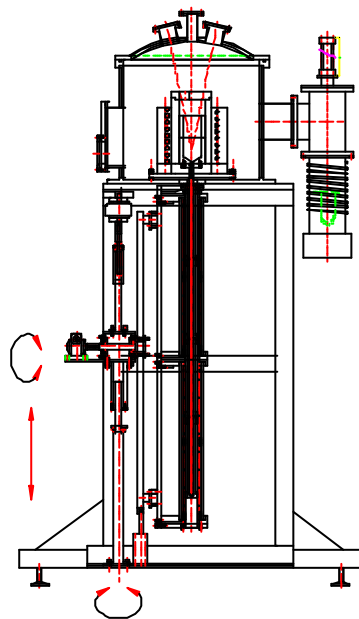
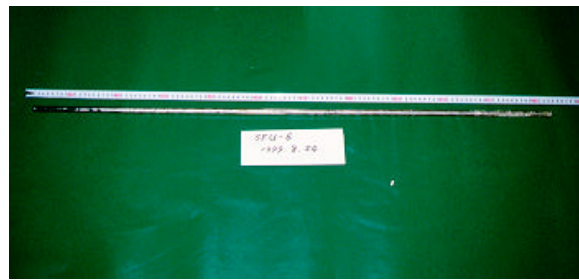
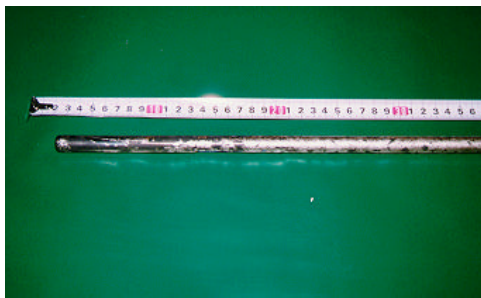


Fig. 2 Schematic diagram of melting and casting furnace for metal rods



(a) Full size

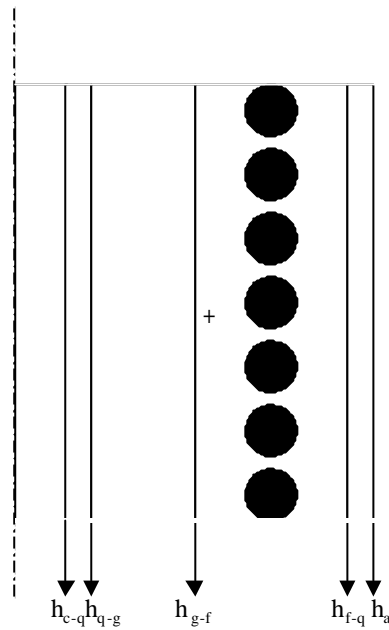


(b) Bottom



(c) Top

Fig. 3 Photograph of uranium metal rod cast by furnace with temperature gradient



- h_{c-q} : heat transfer coefficient between cast and quartz mold
- h_{q-g} : heat transfer coefficient between quartz and graphite mold
- h_{g-f} : heat transfer coefficient between graphite mold and furnace
- h_{f-q} : heat transfer coefficient between furnace and outer quartz mold
- h_a : heat transfer coefficient between outer quartz mold and air
- +
 : thermocouple location

Fig. 4. Definition of the boundary condition for Uranium casting process.

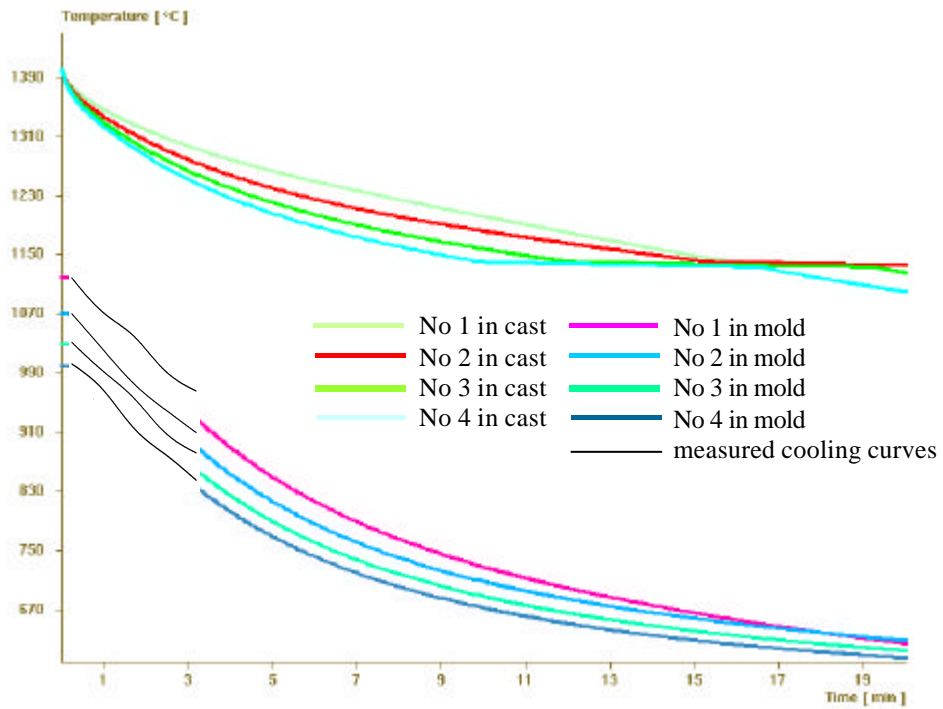
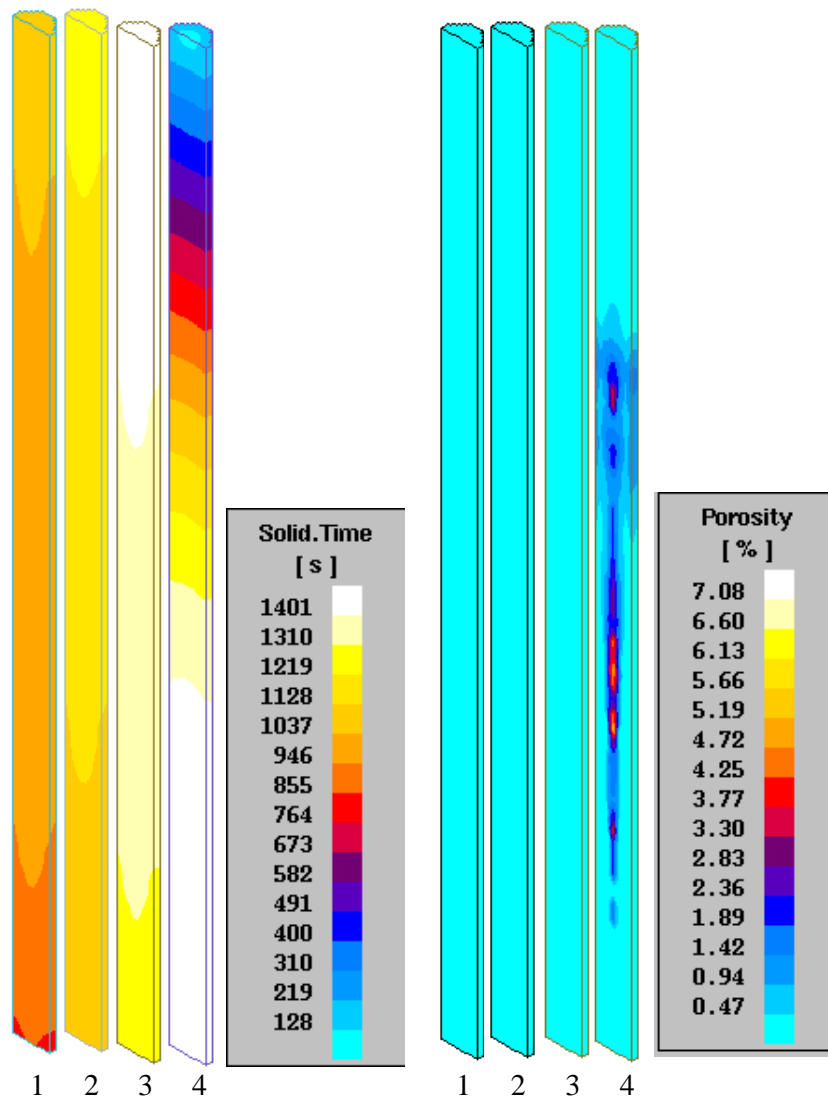


Fig. 5. Measured and calculated cooling curves for Uranium casting.



Each number indicates range from the bottom.
 [1 : 0~350mm, 2 : 350~700mm, 3 : 700~1050mm, 4 : 1050~1400mm]

Fig. 6. Solidification time, a) and porosity contour b) of the Uranium cast.