

사용후핵연료 금속저장봉의 주조 방안 연구

A Study on Casting Uranium Metal reduced
from Spent Fuel to Storage Rods.

이운상, 이돈배, 장세정, 박수봉, 박종만, 김창규
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

이 종 현
충남대학교

요 약

사용후핵연료를 Li 금속으로 환원시켜 우라늄 금속봉으로 주조하여 저장하는 공정을 개발하고 있다. 이 주조봉은 진원도 및 진직도가 좋고, 기공 등 결함이 없도록 주조되어야 한다. 이러한 우라늄 금속봉을 주조하기 위해 진공 중에서 방향성응고 방법과 연속주조 방법을 시험하여 보고 보다 효율적인 방법을 선택하기 위하여 주조장치를 설계 제작하고자 한다. 방향성응고 방법에 의한 주조로의 구조는 로체 내부를 육안 관찰이 가능한 투명 석영관을 사용하였고, 온도를 조절할 수 있는 자동제어 System을 사용하여 주형 상부에서 아래로 4단계의 온도 구배를 줄 수 있도록 구성하였다. 연속주조 방법에 의한 주조로의 구조는 윤활성이 있는 고온 재료 BN을 주형 내벽으로 하고 주형 외벽은 구리로 하여 응고 부분이 쉽게 이탈되면서 주조봉이 하향 인출되도록 하였고, 인출 속도가 조정되는 servo motor가 사용되도록 설계하였다.

Abstract

We have been developing casting methods of uranium metal by Li-reduction process. This rod has to be round, straight, and sound. In order to select a proper process for the casting of uranium metal to rods, the unidirectional solidification method and the continuous casting method have been investigated and the casting equipments for these have been designed. The casting equipment for the unidirectional solidification method consists of a transparent quartz tube mold with 4 automatic controlling zones for giving temperature gradient in order to move the solidification interface from the bottom to the

top. The casting furnace of the continuous casting method consists of boron nitride ring mold surrounded with copper tube, to make solidified rod slide down from mold, and a withdrawal system using servo motor to control the pulling speed.

1. 서론

원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료를 관리하기 위해 제시된 새로운 개념의 사용후핵연료 관리 공정의 마지막 공정은 사용후핵연료를 리튬 금속을 이용하여 환원시켜, 우라늄 금속봉으로 제작하여 그림 1과 같은 형태의 집합체를 제작하는 것이다.

이 금속저장봉은 지름이 약 1.3 cm, 길이 약 3.8 m로 설계되어 있으며, 이 우라늄금속봉을 집합체에 일정한 간격으로 넣기 위해서는 주조된 봉의 진원도 및 직진도가 좋아야 하고, 내부 결함이 없어야 하며, 매끈한 표면을 가져야 한다.

이 연구에서는 일반적으로 가늘고 긴 금속의 주조에 사용되고 있는 방향성응고 방법 및 강 및 비철 금속의 빌렛 생산에서 용융금속에서 연속적으로 주조하여 공정을 간략화하고 제품의 수율을 향상시킬 수 있는 연속 주조 방법에 의한 주조로 장치를 설계하였다.

2. 우라늄 금속의 용해 방법

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 유도를 사용한다. 진공 유도 용해 주조의 특징은 온도 조절이 용이하며, 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 진공 조건($10^{-2} \sim 10^{-3}$ torr)을 적용해야 한다. 용해온도는 약 1300 °C로 설정하였으며, 도가니는 Graphite 봉을 가공하여 사용하며, 도가니 내부에 이형재인 Holcot110(Zirconia 계통의 Slurry Coating 재)을 Coating한 후 건조하여 사용한다.

3. 방향성응고 주조방안

직경이 작은 일정한 길이를 결함 없이 주조하는 방법 중에는 온도 구배를 이용한 방향성응고 방법이 있다. 이 방향성 응고 방법을 적용해 보기 위해 직경 13.5 mm 길이 1.2m의 봉을 주조할 수 있는 고주파 진공용해 주조로를 다음과 같이 설계하였다.

즉 주형의 재료를 육안 관찰이 가능한 석영으로 하여 그 직경은 13.5 mm 길이 1.2 m로 하고, 1300 °C의 우라늄 용탕을 부었을 때, 주형의 상부의 온도는 1100 °C로 하여 아래까지 4 단계로 일정하게 온도구배를 주어, 프로그래밍에 의해 자동으로 온도를 제어하여 아래에서부터 일정하게 응고되면서 응고 수축 공간이 용탕이 채워지면서 전체적으로 건전한 주조봉이 주조되도록 하였으며, 이 때 주형 가열 속도는 60°C/min 이내, 냉각 속도 25°C/min 이

내로 될 수 있도록 열 전달이 양호한 구조가 되도록 설계하였다. 이와 같이 설계한 방향성 용고 주조장치는 그림 1과 같다.

4. 연속주조에 의한 주조방안

연속주조 방법은 강이나 비철금속의 붓을 만들 때, 용해로에서 잉곳을 만들어 다시 가공하여 일정한 크기의 붓으로 주조하는 기존의 방법과는 다르게 용해로에서 직접 인출하여 주조붓을 만드는 방법이다. 또한 연속주조를 하면 표면이 매끈하고 일정한 크기의 지름의 붓을 연속적으로 제조할 수 있다.

일반적으로 연속주조 장치는 크게 나누면 용해로, 턴디쉬 및 몰드, 그리고 인출기 등으로 나뉘어 진다. 이 연구에서는 몰드에 냉각장치가 없는 초기의 연속주조 방법인 반연속주조 방법과 같이 기존에 사용해 오던 고주파유도로를 일부 개조하여 지름 3cm 길이 30 cm의 붓을 길이 15 cm 몰드를 통하여 인출함으로써 우리나라의 연속주조의 가능성을 시험해보려 한다. 이 고주파유도로를 개조하여 주조할 수 있는 길이는 설비의 제약 상 최대 30cm이다. 30cm의 붓을 연속주조 하여 붓으로써 연속주조에 대한 이해와 경험을 바탕으로 사용후핵연료 금속저장붕과 같이 긴 붓을 주조할 수 있는 장치를 설계하는 능력을 갖추려 한다. 이와 같은 연구 목적을 가지고, 연속주조 시 고려해야 할 사항을 검토하여 연속주조 장치를 설계하였다.

가. 용해로

기존의 고주파 유도로는 석영관 내부를 진공도 10^{-3} torr로 유지하면서 석영관 외부의 수냉 구리 코일에 주파수 3 kHz의 교류를 인가하여 용해한다. 용탕은 stopper로 막혀 있어 용해시 들어올려 용탕을 노즐을 통해 직접 몰드로 흘린다.

나. Nozzle의 크기 계산

필요한 주입률에 맞는 노즐 지름은 베르누이의 정리로부터 쉽게 계산된다.

$$Q = ca\sqrt{2gh}$$

여기서 c: vena contracta의 수축계수

a: 노즐의 면적

h: 용탕의 높이

예를 들면 원형 orifice에 대해 평균값이 $c=0.62$ 라 하면, 몰드 면적 A_m cm²로 용융금속을 불 때, 잉고트 인출속도를 v cm/sec.라 할 때, 위 식으로부터 아래와 같이 된다.

$$dn = \frac{2.15\sqrt{A_m v}}{\sqrt[4]{h}}$$

여기서 dn 은 노즐 orifice의 직경(mm)이다. 베르누이의 원리 적용에서는 표면 장력과 점도는 무시하였다. 용탕의 인출속도를 0.5 cm/sec, 몰드의 지름 3 cm 이면,

$$dn = \frac{2.15\sqrt{A_m v}}{4\sqrt{h}} = \frac{2.15\sqrt{7.06 \times 0.5}}{4\sqrt{4}} = 2.9$$

즉 노즐의 크기는 약 2.9 mm가 된다. 따라서 노즐 내부에 이형제인 Holcot로 코팅하기 때문에 코팅 두께 등을 고려하여 노즐의 지름을 3.0 mm로 가공하였다.

다. 몰드의 설계

연속주조에서 몰드의 설계는 매우 중요하다. 몰드를 설계할 때 고려해야 할 변수는 여러 가지이며 이들의 관계는 복잡적이므로 몰드의 설계는 간단하지가 않다. 인출 속도는 잉고트를 인출할 때 응고 표면이 충분한 강도를 가지며, 잉고트가 끊어지지 않고 잉고트와 몰드와의 접촉 저항력이 크지 않아 표면이 매끈하게 주조되는 최적의 속도를 갖도록 해야 하며, 인출할 때 응고 계면이 몰드의 일정 높이에 유지되도록 인출속도를 조정하는 것이 이상적이다. 또한 인출할 때 응고 표면의 두께가 일반적으로 1/2 inch ~ 3/4 inch가 되도록 생각하면서 인출해야 한다. 그러나 이 연구에서는 기존의 고주파유도로를 개조하기 때문에 구리 몰드의 냉각능력 및 응고속도 계산은 일반적인 수냉 몰드의 계산방식과는 맞지 않는다. 따라서 몰드의 재질을 주로 구리로 하여, 구리의 큰 열용량을 이용하여 우라늄 응고시 발생하는 열이 이 몰드에 전달되어 지름 3 cm 길이 30 cm의 붕을 연속주조하였을 때 몰드 온도가 100℃ 이상 올라가지 않을 것이라고 추정하였다. 이 로에서 출탕 시 몰드의 온도는 약 400 ℃이며, 따라서 이 고주파유도로를 개조하여도 연속주조가 가능할 것이라고 판단되었다. 몰드의 길이는 냉각속도 및 안전도를 고려하여 15 cm로 정하였다. 몰드의 윤회작용을 돕기 위해 Boron Nitride를 2 mm 두께로 가공하여 구리 몰드 내면에 삽입하였고, 몰드 내의 응고 상태를 추정하기 위해 몰드의 상단, 중앙, 하단 높이에 열전대를 설치하였다. 더미 바는 응고된 잉고트에서 분리하기 쉽게 각형의 나사를 원추형으로 가공하여 부착하였다. 더미 바를 지지해 주기 위해 원추형의 스프링을 사용하였다.

라. 유한차분법에 의한 응고 거동 계산

연속주조시에 용탕의 응고거동을 계산하기 위하여 상용 FDM code(Magma soft)를 이용하였다. 연속주조과정은 금형과 용탕과의 계면이 지속적으로 변하는 moving boundary문제이지만 Magma로는 현재 해석이 불가능하여 초기 용탕이 dummy bar에 접촉한 후 약 10cm 정도 충전된 후에 응고 시간을 결정하여 인출시점을 계산하였다. 그림 2에 계산에 사용된 mesh를 나타내었다. a)는 노즐, b)는 구리 몰드, c)는 잉고트 부위이며, d)는 dummy bar이다. 또한 구리몰드와 대기의 열전달계수, h_a 는 500W/m²K, 용탕과 몰드와의 접촉 열전달계수, h_c 는 10,000W/m²K로 설정하였다. FDM code는 실제형상에 가깝게 mesh generation을 하기 위해서는 방대한 양의 mesh가 필요하므로 계산의 효율성을 감안하여 유동 및 열전달 해석이 필요한 주물부분, 노즐등은 가능한한 미세하게 mesh를 나누었으며, 열전달만을 계산하는 구리몰드는 조대하게 mesh를 생성하였고 최종 mesh수는 총 80만개정도였다.

그림 3은 용탕 충전 후 20초까지의 냉각곡선을 나타낸다. 몰드쪽의 용탕의 경우는 응고개시 약 2초 후에 응고가 완료되며 중앙부위도 10초 이내에 고상선 이하로 온도가 내려감을 알 수 있다.

마. 인출기

인출기는 2마력의 서보모터를 사용하였고, 인출하기 위해 스테인레스 강선으로 연결하여 속도 0.5 cm/sec로 당긴다. 더미 바를 지지해 줄 수 있도록 원추형의 스프링을 사용하였다. 인출 시 인출속도에 변화를 주거나, 또는 인출 시 일정 시간 멈추도록 싸이클을 주어 당길 수 있도록 컴퓨터 프로그램으로 제어할 수 있도록 장치를 구성하였다. 이와 같은 개념으로 설계된 연속주조 장치는 그림 4와 같다.

5. 결 론

- 1) 방향성응고 방법에 의한 주조로는 투명 석영관을 로체로 사용하고, 주형 상부로부터 4단계로 온도 구배를 줄 수 있도록 자동제어 System을 구성하여 응고면이 하단에서 상부 방향으로 응고하도록 설계하였다.
- 2) 연속주조 방법에 의한 주조로는 윤활성이 있는 고온 재료 BN을 주형 내벽으로 하고 주형 외벽은 구리로 하여 몰드 내경은 3 cm, 길이 15 cm가 되도록 하였으며, 길이 30 cm의 주조봉이 하향 인출되도록 하였고, 인출 속도가 조정되는 Servo Motor가 사용되도록 설계 제작하였다.
- 3) 연속주조 방법은 진공상태 하에서 볼 수 없는 상태에서 주조해야 하며, 이 연구에서 설계한 주조로는 냉각장치가 없으므로, 앞으로 새로운 연속주조로를 설계하기 위해서는 보다 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.
- 4) 시험을 하기 위한 방향성응고 장치 및 연속주조 장치를 설계하여 현재 제작 중이며, 이 주조로가 제작되면 건전한 주조봉을 주조하기 위한 조건을 잡기 위해 많은 실험이 필요하다.

감사의 글: 본 연구는 과학기술부의 원자력개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] 신영준 외 “사용후핵연료 차세대 관리공정 요소기술 검증시험(I)”, 1998, '98 춘계학술발표회 논문집 pp497- 501, 한국원자력학회
- [2] 신영준 외 “사용후핵연료 관리 기술 현황 분석 보고서”, 1998, 한국원자력연구소, p31.
- [3] D.M. Lewis et al, "The Principles of Continuous Casting of Metals", 1956. Metallurgical Reviews, Vol. 1, Part 1.

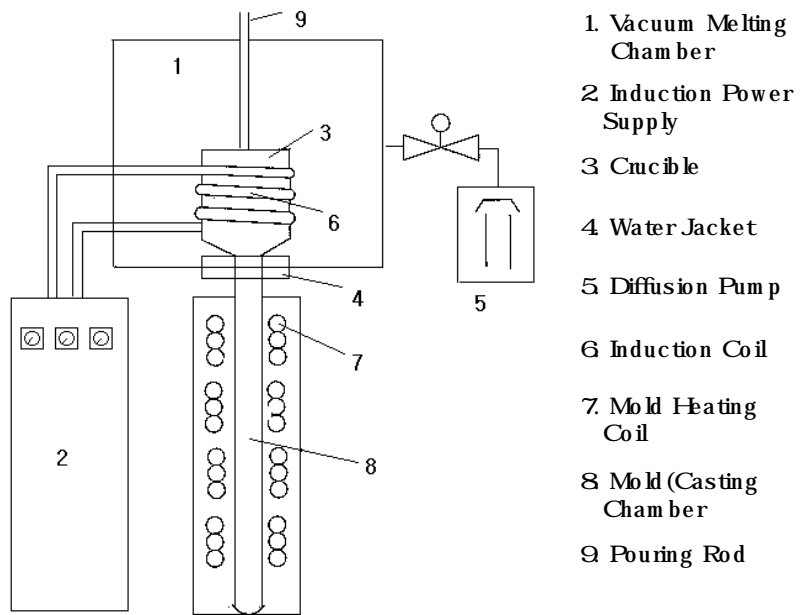
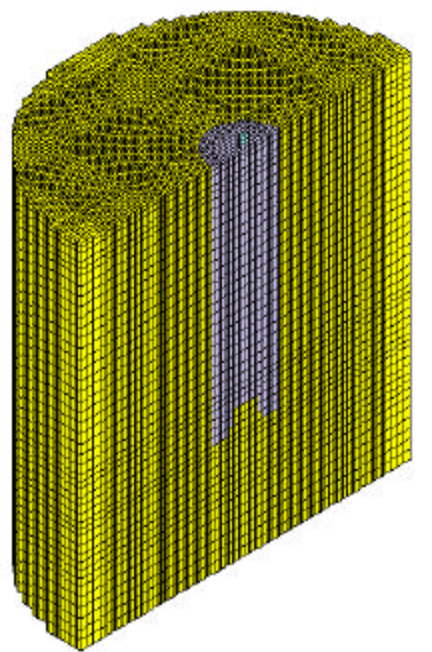


그림 1. 방향성응고 구조장치



a) nozzle b) Cu mold c) cast d) dummy bar

그림 2. 유한차분법 계산을 위한 Mesh 및 경계조건

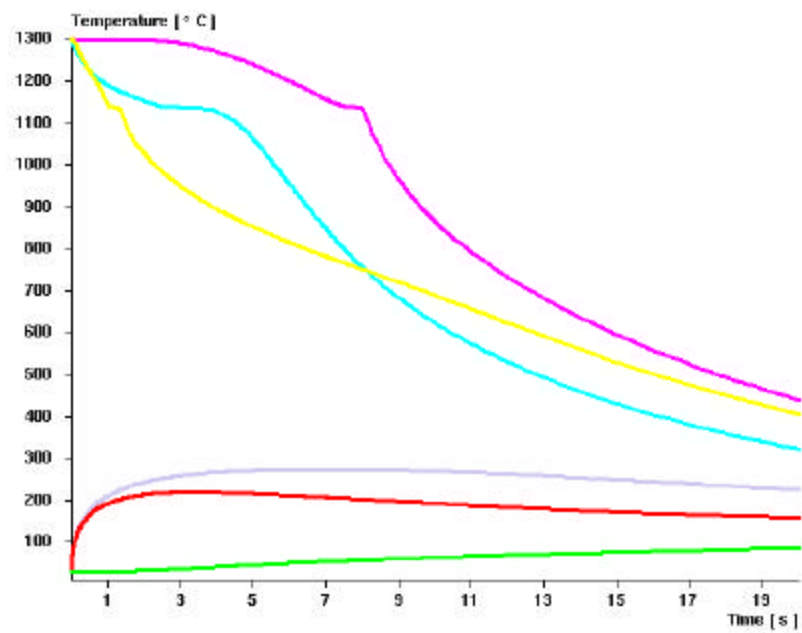
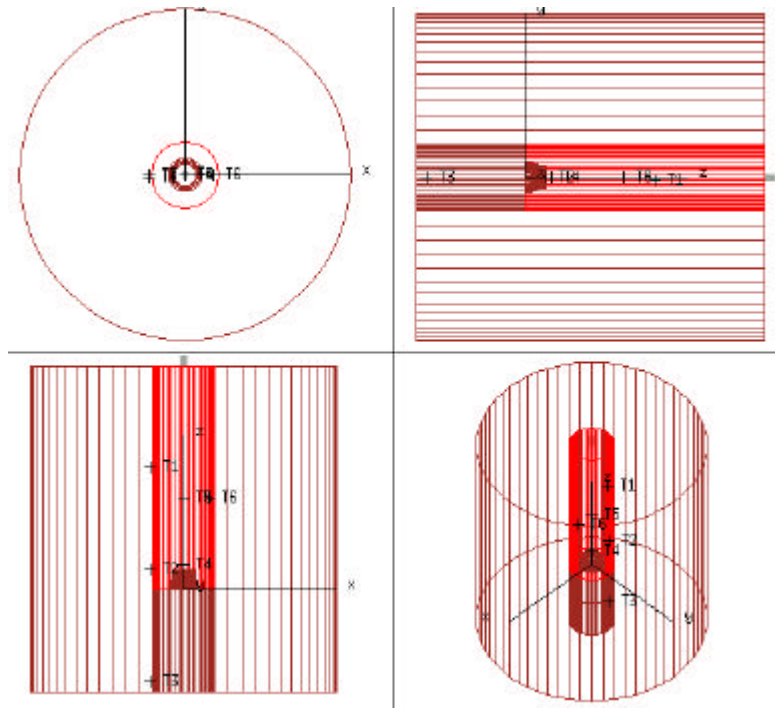


그림 3. 열전대 위치에서 FDM 계산 결과에 의한 냉각 곡선

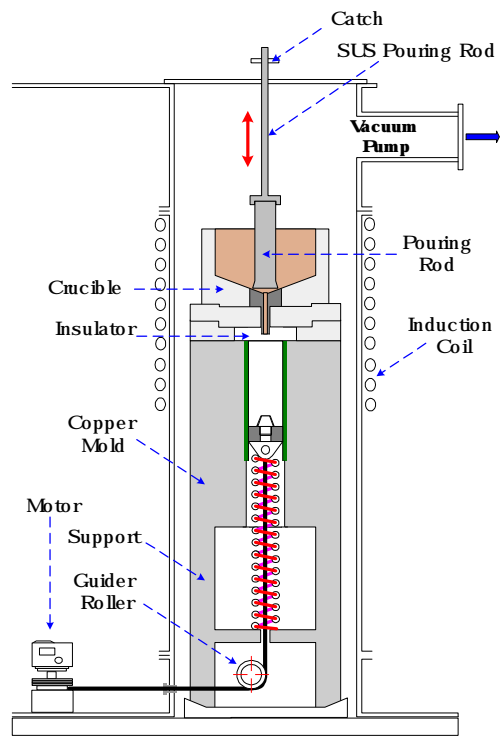


그림 4. 고주파 유도로를 개조한 연속주조 장치