

사용후핵연료 금속저장봉의 연속주조 방안 연구

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

이윤상, 이기영, 권선철, 이주찬, 이돈배, 김창규, 신영준
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

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 연속주조 방법을 적용하여 보았다. 우라늄은 산화성이 강하고, 용해 시 인체에 유해한 가스가 발생하므로, 원격 및 차폐 장치를 갖춘 우라늄 연속주조 장치를 설계하여 제작하였고, 최적의 연속주조 공정을 개발하기 위하여 몰드 재질, 인출 속도 및 몰드 각 부위에서의 온도, 스타터바 재질 등을 변경하여 가면서 연속주조 조건을 관찰하였으며, 연속주조 몰드 내의 고액계면의 위치를 확인하기 위하여 수치해석을 수행하고 실제 측정된 온도와 비교하여 보았다.

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 cast this rod which has a long length and small diameter, the continuous casting equipment was designed and fabricated, which has a shielding and remotely controlling functions because during the melting process, the hazardous gas can be produced. In order to find the optimum continuous casting process, the factors which are the mold material and starter bar material, the mold temperature, withdrawal speed were considered and tested. Also the comparison between the computer simulation results and experiment results was carried out.

1. 서론

원자력발전소에서 발생하는 사용후핵연료를 관리하기 위해 제시된 새로운 개념의 사용후핵연료 관리 공정의 마지막 공정은 사용후핵연료를 리튬 금속을 이용하여 환원시켜, 우라늄금속봉으로 제작하여 캐니스터에 저장한다. 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. [1]

이 연구에서는 이와 같은 가늘고 긴 금속의 주조에 사용되고 있는 연속 주조 방법을 적용하여 사용후핵연료 금속저장봉을 연속주조할 수 있는 장치를 설계 제작하고, 최적의 연속주조 공정을 도출하기 위한 실험을 수행하였다.

2. 연속주조 장치의 설계 및 제작

우라늄 연속주조 장치는 크게 용해장치, 연속주조 장치, gas 공급 및 제어장치, 진공장치, 절단기 및 이송장치, 차폐 및 덕트 등으로 분류할 수 있다. 용해장치는 고주파 유도용해 및 보온 방법에 의한 Ar 분위기 속에서의 수직 반연속 주조법을 사용하였다. 설계 시에는 다음과 같은 요건을 고려하였다.

- 1) 우라늄 금속저장봉 연속주조 장치는 지름 13.5 mm 길이 2.2 m의 봉을 연속으로 주조하기 위한 장치이다. 연속주조 장치의 규모는 우라늄 20 kg을 한 배치로 하여 2.2 m의 우라늄 봉을 2 ~ 3개 주조할 수 있는 규모로 한다. 금속저장봉의 단면은 진원도가 좋아야 하며, 전체 길이에 걸쳐 직진도가 좋아야 한다.
- 2) 우라늄은 산화성이 강하므로 용해 전에 진공 챔버의 진공도를 10^{-4} torr 이상으로 유지한 후 Ar 가스를 Purge하여 용해한다.
- 3) 인출기는 연주봉이 단락되지 않도록 몰드 부위의 수냉 온도 조절 및 인출 속도를 연계하여 자동으로 조절할 수 있는 구조이어야 한다.
- 4) 1차 냉각대는 수냉 챔버를 사용하여 몰드에 부착하고, 2차 냉각대는 Ar 가스를 일정한 양으로 주입하여 우라늄이 대기에 노출될 때 주조봉의 온도는, 온도가 높으면 우라늄봉이 산화되므로, 최대 400 °C 미만이어야 한다.
- 5) gas 공급 장치는 진공 챔버 내에 일정한 압력을 유지할 수 있어야 하며, 2차 냉각에 공급하는 가스는 정량 제어가 가능하도록 조절 장치를 갖추어야 한다.
- 6) 진공 챔버는 전면 개폐식으로 하고, 상부에도 원료 투입 및 도가니 교체 작업 등이 편리한 구조로 하며, 차후에 원료 자동 투입구를 설치할 수 있도록 충분히 큰 sliding 방식의 view port를 설치한다.
- 7) 절단기는 유압으로 구동하는 cutter에 의해 연주된 봉을 순간적으로 절단되도록 하며, 절단 시 우라늄 봉에서 발생하는 불꽃을 막기 위한 Ar 가스 분사가 가능하도록 분사 노즐을 설치한다.
- 8) 이송 장치는 절단된 우라늄 봉을 차폐 덕트 구석으로 이동시킨 후 다시 원위

치 할 수 있어야 한다.

- 9) 차폐 덕트는 한 면은 스테인레스 철판, 그리고 다른 면은 내부의 연주상황을 관찰할 수 있는 구조이어야 하며, 가스를 배기할 수 있는 배기 장치를 갖추어야 한다.

위와 같은 설계 기준에 따라 제작한 연속주조 장치의 설계도면의 개념도 및 장치 사진은 그림 1 및 그림 2와 같다.

3. 연속주조 최적 공정 도출을 위한 시험

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 미리 연속주조 조건에 대한 온도분포를 계산하여 응고 계면의 위치를 계산하여 보았다. 컴퓨터 시뮬레이션은 범용 열유동해석 프로그램인 Fluent 코드를 사용하였다. 연속주조 시 가능하면 응고 계면의 위치가 몰드 전체 길이의 1/3 위치하는 것이 이상적일 것이라 가정하였다. 인출 속도 및 용탕의 온도를 입력 데이터로 하여 계산을 수행하여 보고 실험 결과와 비교하여 보았다. 컴퓨터 시뮬레이션의 해석조건으로는 몰드의 재질은 Graphite 몰드, B/N 몰드로 하였고, 용탕 온도는 1350 °C, 주조속도는 2 mm/s, 냉각챔버 냉각수 온도는 65 °C, 진공챔버 온도는 25 °C, 외기온도는 25 °C, 외부의 대류 열전달 계수는 60 W/m²-K로 하였고 용탕은 copper 및 uranium에 대해 해석을 수행하였다.

제작한 연속주조 장치의 시운전 겸 몰드의 온도 분포를 알기 위해 Cu를 사용하여 시험을 수행하였으며, 대기 중 및 Ar 분위기에서 연속주조를 수행하여 보았고, Ar 분위기에서 최적의 연속주조 시 몰드 온도 분포를 조사하여 보았다. 또한 우라늄을 연속주조 하기 위하여 Cu를 원료로 하여 몰드 재질 및 스타터 바 재질 등을 바꿔가며 시험을 수행하여 산화성이 강한 우라늄을 연속주조 가능한 조건을 조사하였다.

Cu를 사용하여 예비 시험을 한 후 Cu의 최적의 연속주조 조건으로부터 우라늄의 연속주조 조건을 추정하였다. 도가니에 Depleted Uranium을 장입하고, BN 몰드를 사용하고, 스타터바의 재질을 바꿔가며 우라늄 연속주조 시험을 수행하였다.

4. 연속주조 최적 공정 도출을 위한 시험 결과

컴퓨터 시뮬레이션 해석은 Graphite 몰드 및 BN 몰드에 대해서 Copper 및 Uranium 용해에 대해 용탕온도 1350 °C에 대해 수행하였다.

표 1. 컴퓨터 시뮬레이션 해석 결과 (단위 : °C)

해석조건 위치	Graphite 몰드	BN 몰드		비 고
	Copper 주조	Copper 주조	Uranium 주조	
도가니 온도	1198	1202	1199	
다이스(I)	1043	1059	1048	
다이스(II)	623	647	634	
인출봉 온도	334	363	303	
응고계면 발생위치	도가니 하단에서 약 7 mm 하부	도가니 하단에서 11 mm 하부	도가니 하단에서 4 mm 하부	

그림 3에서 고액계면의 위치를 확인할 수 있었으며, Copper를 Graphite 몰드에서 주조할 때는 도가니 하단에서 약 7 mm 즉 몰드 상부에서 67 mm, Uranium을 BN 몰드에서 주조할 때는 64 mm로 고액계면의 위치는 거의 이상적인 위치에 분포함을 알 수 있었다.

Cu의 연속주조 조건은 도가니 온도를 1100, 1150, 1200, 1250 °C로 바꿔가며 시험을 해 보았다. 용탕온도 1300°C, 몰드 온도 1200 °C, 다이스(I) 1050°C, 다이스 650°C 일 때 연주봉 인출 실패 없이 연속주조가 잘 되었다. Cu로 연속주조한 연주봉은 기공 등의 결함이 없고 진원도 및 직진도가 좋은 연주봉이 얻어졌다. 그림 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 이전에 시험한 방향성응고로에서[2] 제작한 봉에는 많은 기공 및 표면 상태가 거칠었으나 연속주조 장치에서 주조한 봉은 표면이 매끈한 결함이 없는 봉이 주조되었다.

최적의 연속주조 조건은 응고 조직이 45도 방향으로 되면 다음 공정에서 결함 발생이 적은 것으로 알려져 있다.[3] 그림 5는 Cu의 거시 주조 조직으로 인출속도를 7mm 인출 2초 정지했을 때의 주조 조직을 보여준다. 주조봉의 표면에서 약 45도 방향으로 응고 조직이 성장할 때 연속주조의 최적조건이 얻어지나, 아직까지는 충분한 실험을 하지 못한 상태이다.

현재까지 실험의 결과로는 Cu의 최적의 연속주조 조건으로는 도가니의 온도가 1200 °C일 때 연속주조에서 단락 현상을 줄일 수 있는 것으로 확인되었으며, 우라늄을 연속주조하기 위해 도가니의 온도가 1250°C에서 BN 몰드를 사용하고, 텅스텐

스타터바를 사용하여, 인출속도 분당 50 mm ~ 100 mm의 속도로 인출할 경우 고액계면의 위치가 몰드 상부로부터 약 70 mm 위치 부근에 위치하여 이상적인 우라늄 연속주조가 될 것으로 판단된다.

5. 결론

사용후핵연료의 금속저장봉을 주조하기 위하여 연속주조방법을 적용하기 위하여, 연속주조장치를 설계 제작하였고, 우라늄을 연속주조하기 위하여 연속주조 최적의 공정을 도출하기 위하여 여러 변수를 바꿔가며 시험해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 산화성이 강하고, 인체에 유해한 금속을 연속주조하기 위한 장치를 성공적으로 제작하였다.
2. Cu를 사용한 예비실험을 수행하였고, 우라늄을 연속주조하기 위한 최적의 몰드 온도, 몰드 재질, 스타터바 재질 및 인출 속도를 추정할 수 있었다.
3. Fluent 코드를 사용한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과가 거의 잘 일치하였다.
4. 연속주조장치에 의해 주조된 봉이 방향성응고장치에 의해 주조된 봉보다 기공과 같은 결함이 없는 건전한 주물을 얻을 수 있었다.

감사의 글: 본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] 노성기 외, “사용후 핵연료 저장기술개발“ KAERI-NEMAC/RR-166/96
- [2] 이돈배 외, “방향성응고장치를 이용한 사용후 핵연료 금속저장봉 주조기술 개발 “ 99 추계학술 발표회논문집, 한국원자력학회
- [3] Rudi G. Piesche, “Solidification in Continuous Casting”, Journal of the institute of metals, 1970. Vol. 98 pp339-344.

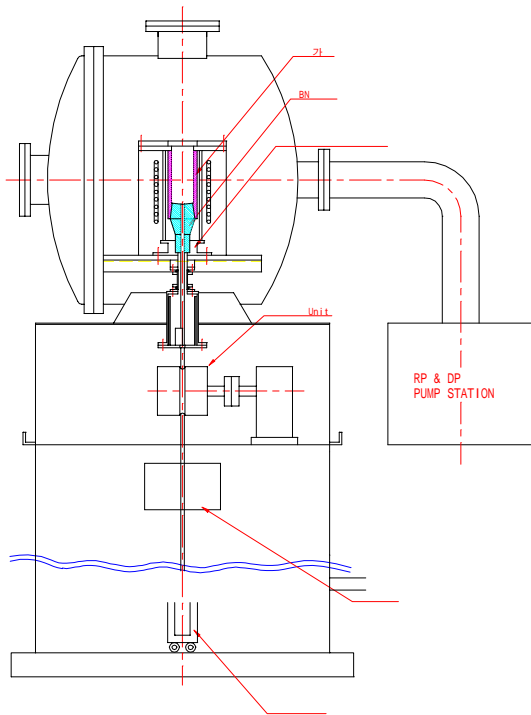


그림 1. 연속주조장치 개념도



그림 2. 제작된 연속주조 장치 전경

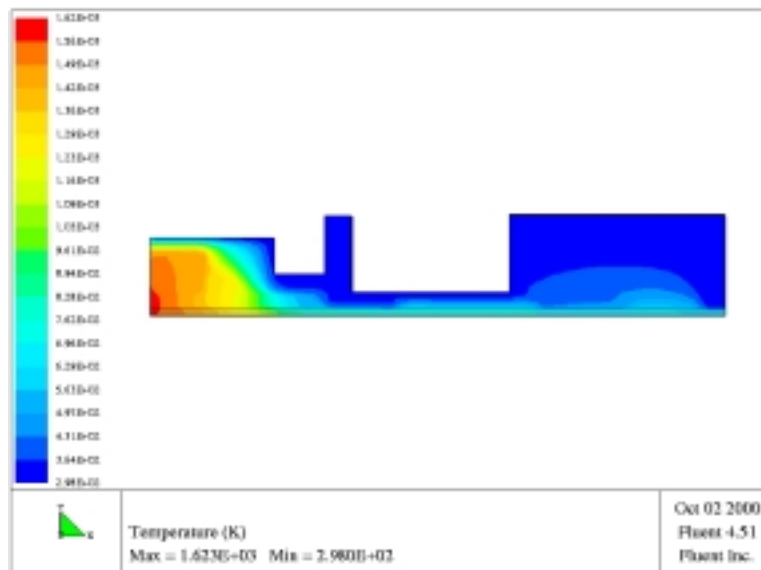


그림 3-a. Copper에 대한 Graphite 몰드를 사용한 경우 연속주조 응고해석 결과

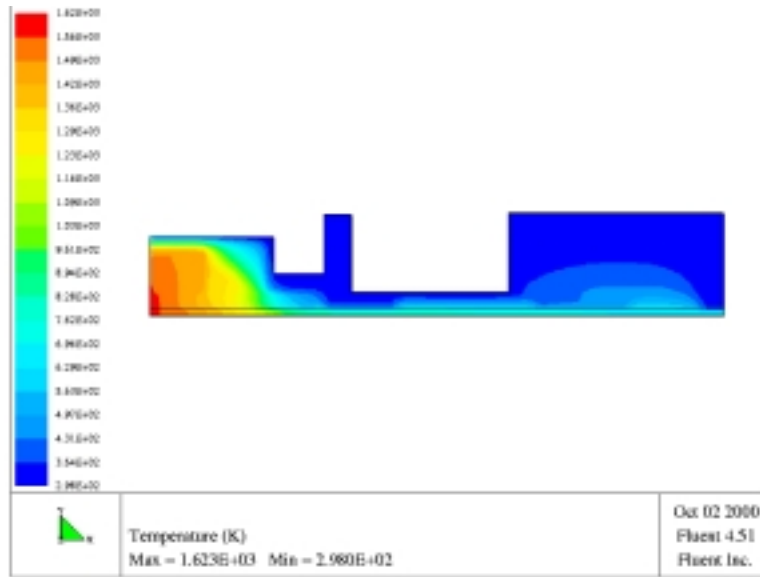


그림 3-b. Copper에 대한 BN 몰드를 사용한 경우 연속주조 응고해석 결과

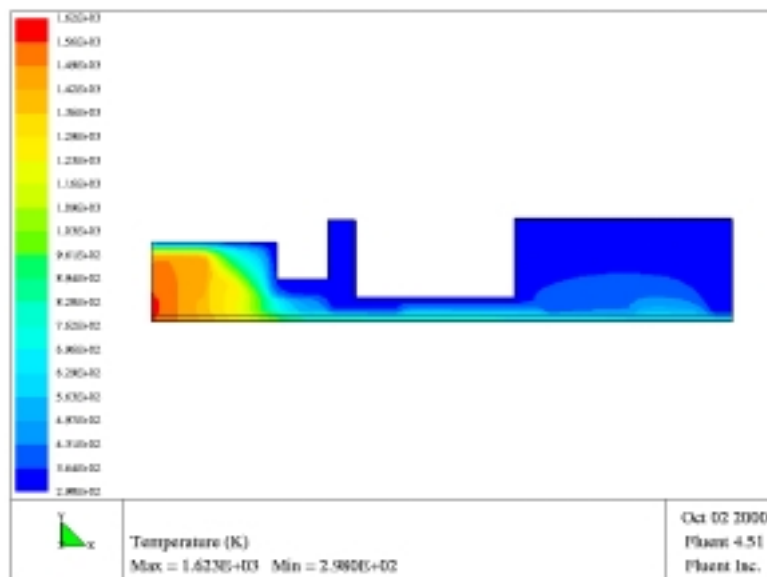


그림 3-c. Uranium에 대한 BN 몰드를 사용한 경우 연속주조 응고해석 결과



그림 4. 인출속도 180mm/분일 때의 응고 조직



그림 5. 방향성응고에 의한 Cu 봉(위) 및 연속주조에 의한 Cu 봉(아래)