

# 개량 사출주조법에 의한 휘발방지 재순환 금속연료심의 제조

김기환\*, 김종환, 김형태, 오석진, 이찬복

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

\*khkim2@kaeri.re.kr

## 1. 서론

미국에서 1960년대에 개발된 소듐냉각고속로(SFR) 금속연료심 진공 사출주조방법은 장수명 핵종(Pu, Np, Am, Cm)중 휘발성이 강한 Am의 휘발을 억제할 수 없으며, 주조공정중 연료물질의 회수율이 낮은 편이다. 이를 극복하기 Am의 휘발을 방지하고, 높은 수율과 낮은 연료손실을 가지는 파이로 재순환 금속연료심을 제조하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 금속연료심 사출주조방법을 개량하여 대체기술인 휘발방지 재순환 금속연료심 제조방법을 개발하고자, 개량사출주조방법으로 금속연료심을 제조하고, 주조성, 휘발성, 연료손실을 및 품질 등을 평가하였다.

## 2. 본론

### 2.1 실험 방법 및 절차

재순환 핵연료에 포함되는 장수명 핵종 중 가장 증기압이 큰 원소는 Am이다. Am의 증기압은 일반 사출주조 온도에서 Pu 보다 3승, U 보다 5승 높은 증기압을 가진다. Am과 유사한 증기압을 가지는 원소로는 Sm과 Mn가 있는데 본 실험에서는 취급이 용이한 Mn을 사용하였다. 용해원료 장입은 Zr, Mn, U 순서로 하여 용융점이 낮은 금속이 위에서 용해되어 남은 금속을 그 다음 용해으로써 고온에서 연료손실 가능성을 최소화 하였다. 온도 조절은 PID 제어로 프로그램화 하여 자동화 하였다. 유도 코일 부위와 용해도가니 내부의 온도 편차가 크므로 PID 제어 온도는 양방향 스위치를 두어 프로그램 온도와 목표온도 편차를 최소화 하였다. 흑연도가니 내부의 금속연료 원료인 우라늄과 지르코늄이 잘 혼합되도록 1600°C에서 약 10 분간 유지하였고 출탕온도는 약 1500°C에서 수행하였다. 용해도가니 내부 온도가 약 700°C일 때 불활성 가스 분위기를 하여 가압상태로 하여 고온에서 휘발을 제어하도록 하였다.

### 2.2 실험 결과 및 검토

재순환 금속연료심 제조방법을 진공사출 주조법을 개량하여 Ar 불활성 분위기에서 가압하여 금속연료를 용해, 주조하는 개량 사출 주조법을 적용하여 휘발 금속연료심을 제조하고, 그 특성을 평가하였다. 먼저는 모의연료(Cu)를 사용하여 개량사출 주조시험을 수행하여 가압압력, 용해주조온도 및 용탕침적시간과 같은 주조공정변수 최적화를 수행하였다. PID 제어를 통해서 용해주조온도 미세조절 방안 도출로 주조 재현성이 획기적으로 향상되었다. 그 다음 Am과 유사한 증기압을 가지는 휘발대체물질 Mn 사용하여, 휘발방지가 가능한 U-10wt%Zr-5wt%Mn 개량사출 주조공정변수를 조사하였다. 금속연료심 용해 분위기압력과 주조 가압압력을 변화시키면서 금속연료심 전체길이, 휘발성 및 금속연료 손실율에 미치는 분위기압력과 가압압력의 영향을 조사하였다.

그 결과, Fig. 1에서 나타내는 바와 같이, 재순환 연료심 주조공정변수의 최적화로 석영관 전체주형길이 250 mm에 대해서 길이 200 mm의 휘발 연료심을 건전하게 제조되었다. 개량사출 주조법에 의해 제조된 금속연료심의 부위별 합금조성 분석결과를 Table 1에 나타내었다. 재순환 연료심의 휘발성 원소인 Mn은 휘발되지 않고 회수되었으며, 불순물 원소인 C, N, O 그리고 Si 의 총 함량은 2,000 ppm 이하로 조절되었다. 용해주조 후 금속연료 손실율을 Table 2에 나타내었다. 금속연료 손실율도 0.1% 이하로 휘발이 발생되지 않았음을 확인할 수 있었다.



Fig. 1. Volatile U-10wt%Zr-5wt%Mn fuel slug fabricated by modified injection casting.

Table 2. Alloy composition of U-U-10wt.%Zr-5wt.%Mn fuel slug

원소 부위	U (wt.%)	Zr (wt.%)	Mn (wt.%)	Si (ppm)	C (ppm)	O (ppm)	N (ppm)
상부	85.2	10.7	5.1	100	70	480	10
중부	85.5	10.5	5.0	300	60	770	10
하부	84.1	10.8	5.0	300	90	820	10

Table 3. Fuel loss rate of U-10wt%Zr-5wt%Mn fuel slug

	Casting part	Mass (g)	Fraction (%)
Before casting	Crucible	608.2	100
After casting	Crucible assembly	538.7	88.57
	Mold assembly	68.2	11.21
Fuel loss		1.3	0.21

### 3. 결론

Am과 같은 장수명 휘발성 MA(마이너 액티나이드)를 함유하는 재순환 금속연료심의 제조방법을 개발하고자, 진공사출 주조법을 개량하였다. Ar 불활성 분위기에서 가압하여 금속연료를 용해, 주조하는 개량 사출 주조법을 적용하여 휘발방지 재순환 금속연료심을 제조하고, 그 특성을 평가하였다. 그 결과, 개량 사출주조 및 특성시험을 수행하여, 주조공정변수의 최적화로 휘발방지 연료심을 건전하게 제조할 수 있었다. 휘발방지가 가능하며, 낮은 연료손실율을 가지는 재순환 휘발 연료심을 제조할 수 있었다. 이로서, 개량사출 주조법에 의한 재순환 금속연료심 제조 타당성을 확인할 수 있었다.

### 4. 감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012M2A8A5025923).

### 5. 참고문헌

- [1] J. H. Kittel, B. R. T. Frost, J. P. Mustellier, K. Q. Bagley, G. C. Crittenden, and J. V. Dievoet, "History of fast reactor fuel development", J. of Nuclear Materials, 204, 1-13, 1993.
- [2] C. L. Trybus, J. E. Sanecki, and S. P. Henslee, "Casting of metallic fuel containing minor actinide additions", J. of Nuclear Materials, 204, 50-55, 1993.
- [3] P.S. Chen, W.C. Stevens, C.L. Trybus, "Reusable Molds for Casting U-Zr Alloys", Fall meeting of the Metallurgical Society and AIMPE, Nov. 1-5, Chicago, USA (1992).