

소듐냉각고속로 U-10wt%Zr 금속연료심 스크랩 재활용 주조에 관한 연구

하성준^{1,2*}, 김기환², 고영모², 박정용², 홍순익¹

¹충남대학교, 대전광역시 유성구 대학로 99

²한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111

*hsj622@kaeri.re.kr

1. 서론

현재 원자력 발전의 지속적인 발전을 위해 개발 중인 실현가능성이 높은 4세대 원자로 중하나인 소듐냉각고속로(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)의 기술 개발은 매우 중요하다. 원자로 기술 개발에 있어 금속연료 제조기술 개발은 매우 중요하다. 현재 초기노심 핵연료인 U-10wt.%Zr 금속연료심 진공사출주조에 있어서 회수율이 약 60%로 진공용해 장입량의 40%의 금속연료심 스크랩이 생긴다. 이러한 이유로 고가의 핵연료물질 재활용 및 방사선 폐기물 최소화화를 위해 금속연료심 스크랩 폐기물 재활용 주조기술을 개발하는 것이 필요하다. 금속연료심 스크랩 재활용 제조를 통해 연료심 회수율을 90% 이상 증가시키고 우라늄 이용률 증가시키고 고준위 폐기물을 최소화 하고자 한다.

본 연구는 U-10wt.%Zr 금속연료심 스크랩 재활용에 관한 연구를 하고자, 기계적인 방법과 산 세척을 통해 표면불순물을 제거 후 금속연료심을 진공사출주조법으로 제조하고, 금속연료심의 주조 건전성, 미세조직, 합금조성 등을 평가하고자 하였다.

2. 본론

2.1 실험 방법 및 절차

U-10wt.%Zr 금속연료심 진공사출주조에 있어서 연료심 제조 후 Fig. 1과 같이 용해도가니 내에 금속연료심 스크랩 즉, 잔탕(heel)이 생긴다. 잔탕은 금속연료심 재활용 제조의 주원료이다. 잔탕에는 많은 산화물 등 표면불순물이 존재하기 때문에 재활용하기 위해서는 질산용액(HNO₃)에 용해하여 불순물들을 제거하여야 한다. 불순물들을 제거하기 전 잔탕을 용해하기 용이하게 1/4로 자르고, 잔탕 표면에 있는 불순물들을 기계적인 방법으로 제거하였다. 다음, 질산용액으로 세척하기 위한 실험 장비로는 bubbling이 가능한 자체 제작한 bubble clean equipment를 사용하였다. 실험 조건으로는 2M 질산용액에 1 시간 동안 세척을 하였다. 다음

질산용액 제거를 위해 잔탕을 초음파 세척기를 통하여 세척 후, 사출주조장치를 이용하여 연료심을 제조 하였다. 흑연도가니와 석영관 주형은 Y₂O₃ slurry coating을 하였고, 용해 조건으로는 진공상태로 1600°C까지 가열 하고 용탕 혼합이 잘 되도록 10 분 동안 유지하였고, 1550°C에서 연료심을 주조 하였다. 재활용 금속연료심 제조방법은 진공사출 주조법을 적용하여 금속연료심을 제조하였다. 주조 후 연료심을 회수하였고, 연료심 표면에 부착된 Y₂O₃ slurry coating을 제거한 다음 재활용 U-10wt.%Zr 금속연료심을 평가하였다. 재활용 주조 금속연료심은 육안관찰, 연료손실 평가, 밀도 측정, 미세조직, 합금조성 등을 통하여 품질 특성을 평가하였다.



Fig. 1. U-10wt%Zr heel srcap.

2.2 실험 결과 및 검토

Fig. 2에서 나타나는 바와 같이 재활용 U-10wt.%Zr 금속연료심 주조공정변수의 전체주형 길이 400 mm에 대해서 길이 340 mm의 재활용 U-10wt.%Zr 연료심을 건전하게 제조하였다. 먼저 U-10wt.%Zr 금속연료심 잔탕에 의해 제조된 금속연료심의 표면은 대체로 매끈하였으며 전반적으로 건전하게 나타났다. 또한 금속연료심의 밀도 측정 결과를 Table 1에 나타내었다. 금속연료심 밀도의 품질사양(15.3~16.1g/cm³)에 만족하여 재활용 U-10wt.%Zr 금속연료심의 주조 건전성 및 합금원소 균일성을 확인할 수 있었다. 금속연료심 손실을 Table 2에 나타내었다. 금속연료심 손실은 +0.5g이지만 일부 slurry 도포재가 흑연도가니에서 분리되어 포함되어 되었기 때문에 실제 질량 손실은 거

의 없는 것으로 생각된다. Table 3에 나타나는 바와 같이 불순물 원소인 C, N, O 그리고 Si의 총 함량은 2,000 ppm 이하로 조절 되었다. Fig. 3에서 나타나는 바와 같이 전형적인 laminar structure를 가진 U-10wt.%Zr 금속연료심 미세조직을 볼 수 있었다.

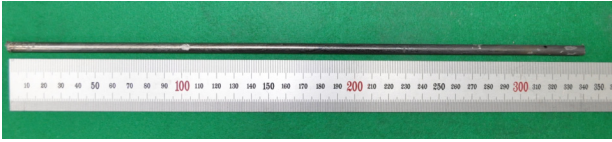
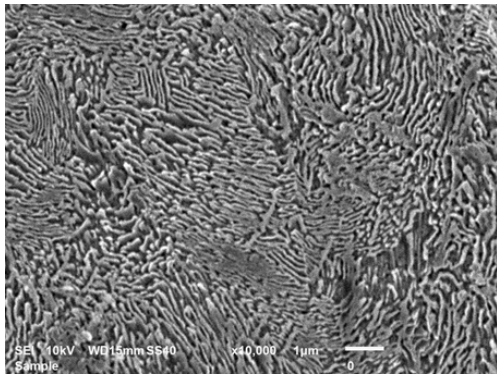
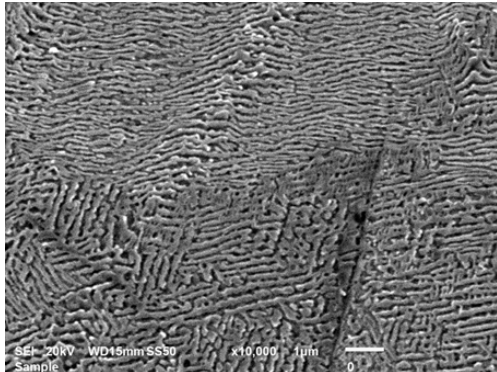


Fig. 2. Metal fuel slug fabricated with recycled heel by vacuum injection casting.



(a)



(b)

Fig. 3. Scanning electron micrographs of U-10wt.%Zr fuel slug; (a) bottom, (b) top.

Table 1. Density of U-10wt.%Zr fuel slug fabricated with recycled heel

위치	Density (g/cm ³)
상부	15.8
중부	15.4
하부	15.8
평균	15.6

Table 2. Mass balance of U-10wt.%Zr fuel slug fabricated with recycled heel

원소 위치	U (wt.%)	Zr (wt.%)	Si (ppm)	C (ppm)	H (ppm)	O (ppm)	N (ppm)
상부	88.4	10.3	102	250	1	800	140
하부	89.3	10.4	497	40	1	1220	120

Table 3. Alloy composition of U-10wt.%Zr fuel slug

조건	종류	질량 (g)
용해 전	용해원료 (heel)	851.8
	흑연도가니	939.9
용해 후	금속연료심	450.9
	heel + dross	401.4
	흑연도가니	939.2
질량 손실		+0.5g

3. 결론

소듐냉각고속로 초기노심 핵연료인 금속연료심의 회수율을 증가시켜서 고가의 핵연료물질 재활용을 최대화하고 방사선 폐기물을 최소화하기 위하여, U-10wt.%Zr 금속연료심의 잔탕 스크랩을 재활용에 대해 연구를 수행하였다. U-10wt.%Zr 금속연료심의 잔탕 스크랩을 세척하여 진공사출 주조장치를 이용하여 연료심을 제조하였고, 그 특성을 평가하여 금속연료심 스크랩 재활용 제조 타당성을 확인할 수 있었다.

4. 참고문헌

- [1] J.H. Kim, H. Song, K.H. Kim, and C.B. Lee, "Fabrication and evaluation of rare-earth-bearing fuel slugs for sodium-cooled fast reactors" *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 303 (1): 615-621, January 2015.
- [2] E.H. Lee, K.W. Kim, D.Y. Chung, H.B. Yang, K.Y. Lee, S.R. Sung, H.K. Choi, J.T. Hyun, and J.G. Lim, "Dissolution characteristics of impurities and U in the uranium mixture" KAERI-TR4366, July 2011.