SFR 금속핵연료의 기계적 특성 평가

김선기, 이종탁, 오석진, 고영모, 김기환, 우윤명, 이찬복
한국원자력연구원, 대전시 유성구 대덕대로 1045
kimsk@kaeri.re.kr

1. 서론

U-Pu-Zr와 같은 금속핵연료는 1980년대 이후로 소듐냉각고속로(Sodium-cooled Fast Reactor; SFR)의 핵연료로서 고려되어 minor actinides를 제어하고 고방사선 준위를 낮추기 위한 핵연료 주기와 연계하여 연구가 수행되고 있다. 금속핵연료는 미국 Hanford에서 가동되던 Pu 생산 원자로, 실험증식로(Experimental Breeder Reactor; EBR)와 영국의 Dounreay Fast Reactor (DFR) 등 초기 원자로의 핵연료로서 사용되었었다[1-3].

그러나 본 연구에서는 국내에서 Pu을 취급할 수 없으므로 Pu을 배제한 U-Zr 금속 핵연료 및 U-Zr-Ce 금속 핵연료를 제조하여 그 물성을 시험 평가하고 있다. 국내 제조 금속핵연료의 물성 평가는 핵연료성능에 지대한 영향을 미치므로 이에 대한 정확한 물성 평가 DB는 핵연료성능 모델링 및 추후 코드개발에 필수적인 자료로 활용될 수 있다. 그러나 전세계적으로 이러한 금속핵연료에 대한 기계적 특성 관련 물성에 대한 시험자료가 국내외 적으로 매우 부족한 것이 현실이다.

이에 본 연구에서는 본 연구원에서 제조된 연료심에 대한 기계적 물성을 평가하고자 인장시험을 수행하였으며, 이를 토대로 항복강도, 최대인장강도와 같은 기계적 강도와 연신율을 통해 연성을 평가하였다.

2. 본론

본 연구에서 개발하고 있는 금속핵연료의 기계적 물성을 평가하기 위해, U-5Zr, U-15Zr, U-10Zr-2Ce, U-10Zr-4Ce, U-10Zr-6Ce의 2원계 합금 연료 및 3원계 합금 연료를 대상으로 상온에서 인장특성을 평가하였다. 먼저, Figure 1은 핫셀내에 설치한 인장시험용 실험장치이며, 인장시험 후 판단된 시편의 모습을 보여주고 있다.

먼저 2원계 금속연료심의 기계적 특성을 살펴보면, Figure 2에서 보는 바와 같이, U-15Zr 금속연료심의 기계적 강도와 연성이 모두 U-5Zr 금속연료심에 비해 매우 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 각 곡선의 면적을 대비해 볼 때, U-15Zr 금속연료심의 인성(toughness) 또한, U-5Zr 금속연료심의 인성에 비해 매우 높음을 알 수 있다.

다음으로 3원계 금속연료심의 기계적 특성을 살펴보면, U-10Zr-2Ce 금속연료심의 경우 응력-변형 곡선에서 보는 바와 같이, 약 465 MPa의 응력에서 파단이 발생하였으며, 이 때 변형은 약 1.1% 정도로서 거의 변형 없이 파단이 발생하였다. 또한, U-10Zr-4Ce 금속연료심의 경우에는 응력-변형 곡선에서 보는 바와 같이, 약 505 MPa의 응력에서 파단이 발생하였으며, 이 때 변형은 약 1.3% 정도로서 낮은 변형량에서 파단이 발생하였다. 마지막으로 U-10Zr-6Ce 금속연료심의 경우에는 응력-변형 곡선에서 보는 바와 같이, 약 430 MPa의 응력에서 파단이 발생하였으며, 이 때 변형은 약 1.0% 정도로서 앞서 연료심들과 마찬가지로 파단 전 변형이 거의 없이 매우 낮은 변형량에서 파단이 발생하였다.

본 연구에서 수행한 기계적 특성시험 결과를 Table 1에 요약 정리하였다. 본 연구의 금속핵연료는 특성 상 매우 brittle한 재료로서 모든 시편들이 인장강도 지점에서 파단이 발생하므로 균일연신율(uniform elongation; UE) 및 총연신율(total elongation; TE)의 구분이 불가능한 특성을 보여주었으며, 취성이 매우 큰 재료라 연신율이 너무 작아서 항복(yielding) 없이 파단이 발생한다고 판단된다. 따라서 항복강도를 따로 도출하는 것은 무의미하고 최대인장강도와 유사한 값을 갖는다고 평가할 수 있다.

3. 결론

소듐냉각고속로 금속핵연료심의 기계적 특성을 평가하기 위하여 U-Zr 2원계 합금과 U-Zr-Ce 3원계 합금을 주조공정을 통해 제조하였으며, 제조 핵연료심에 대한 기계적 특성으로서 최대인장강도와 연신율을 평가하였다.

본 연구에서 나타난 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 주조공정으로 제조된 5종의 금속핵연료심 모두 파단 시 변형이 거의 발생하지 않았으며, 인장응력 방향에 수직인 방향으로 파단이 발생함으로써 매우 취한(brittle)한 금속의 재질임을 보여주었다.

둘째, U-15Zr 금속연료심의 기계적 강도와 연성이 모두 U-5Zr 금속연료심에 비해 매우 높게 나타났으며, U-15Zr 금속연료심의 인성(toughness) 또한, U-5Zr 금속연료심의 인성에 비해 매우 높은 것으로 평가되었다.

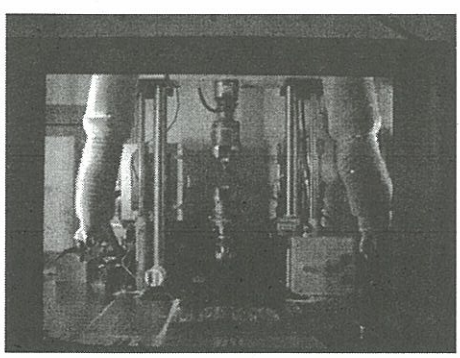
셋째, U-10Zr-2Ce과 U-10Zr-6Ce 금속연료심의 기계적 강도와 연성거의 유사함을 알 수 있다. 그러나 U-10Zr-4Ce 금속연료심의 기계적 강도와 연성은 이들 U-10Zr-2Ce과 U-10Zr-6Ce 금속연료심의 기계적 강도와 연성보다 다소 높게 나타났으나, 그 차이는 크지 않았으며, Zr에 비해 Ce의 합금 영향은 크지 않은 것으로 보인다.

4. 참고문헌

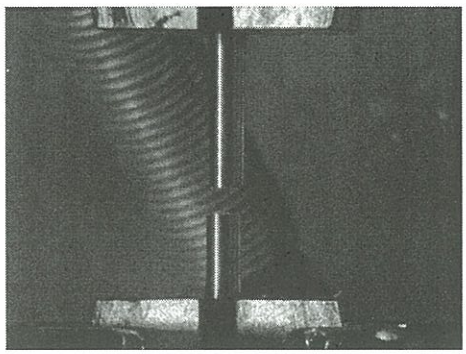
[1] L. C. Walters, B. R. Seidel, and J. H. Kittel, *Nuclear Technology,* **65**, 179-185 (1984).

[2] J. H. Kittel, B. R. T. Frost, J. P. Mustellier, K. Q. Bagley, G. C. Crittenden, and J. V. Dievoet, *Journal of Nuclear Materials,* **204**, 1-8 (1993).

[3] L. C. Walters and J. H. Kittel, *Nuclear Technology,* **48**, 273-278 (1980).



(a)



(b)

Fig. 1. Experimental apparatus installed in a Hot cell for mechanical test of SFR metallic fuels (a) experimental apparatus, (b) fractured specimen

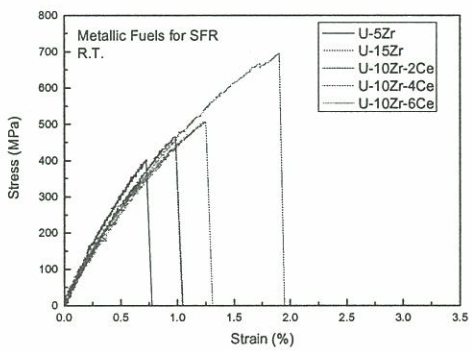


Fig. 2. Comparison of stress-strain curve of between U-Zr binary metallic fuels and U-Zr-Ce ternary metallic fuels

Table 1. UTS and elongation data of SFR metallic fuels

Metallic Fuel	Test Temp.	UTS (MPa)	Elong. (%)
U-5Zr	R.T.	401.81	0.727
U-15Zr	R.T.	696.00	1.927
U-10Zr-2Ce	R.T.	465.11	0.988
U-10Zr-4Ce	R.T.	505.66	1.265
U-10Zr-6Ce	R.T.	431.08	0.981