SFR 금속핵연료의 열적 성질에 관한 연구

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

1. 서론

U-Pu-Zr와 같은 금속핵연료의 경우 세라믹 핵연료와 함께 소듐냉각고속로(Sodium-cooled Fast Reactor; SFR)의 핵연료 물질로서 고려되고 있다. 국내에서는 이 가운데 금속핵연료에 초점을 맞추어 중력주조법에 의해 금속핵연료 제조법을 개발하고 있다. 개발되는 핵연료의 경우 여러 물성이 모두 중요하지만, 핵연료라는 특성 상 열적 특성이 가장 중요한 물성으로 간주되고 있다. 그러나 이러한 열적 특성은 SFR 핵연료의 매우 중요한 데이터임에도 불구하고 열용량(비열), 열팽창율, 열확산도, 열전도도 등과 열적 특성 자료는 그 자료가 매우 부족한 실정이다[1-3]. 따라서 본 논문에서는 SFR 핵연료의 열용량 특성, 열팽창율 특성, 그리고 열전도도 평가를 위한 열확산도 특성 관련 열적 특성 관련 국내외 주요 실험결과에 대하여 논의하고자 한다.

2. 본론

핵연료의 열적특성은 핵연료의 성능과 직결되므로 매우 중요한 특성 중의 하나로서 그 중 열전도도는 핵연료의 성능 및 안전여유도(safety margin)에 있어서 매우 중요한 인자이다.

Figure 1은 INL(Idaho National Laboratory)에서 수행한 0U-20Pu-3Am- 2Np-15Zr SFR 금속핵연료용 합금에 대한 열용량과 열확산도 측정값을 온도에 따라 보여주고 있다. U-금속의 경우 669℃에서 orthorhombic 결정구조를 갖는 α-U에서 tetragonal 결정구조를 갖는 β-U으로 상변태를 하게 되는데, pure U 금속이 아닌 U-합금의 경우 669℃ 전후에서 상변태가 발생한다. 상변태가 발생할 경우, 온도에 따른 열용량, 열팽창, 열확산도 등과 같은 열적 거동이 온도에 따라 급격한 변화하는 천이(transition) 현상이 발생한다. 따라서 Figure 1에서는 상변태가 발생하기 전까지의 열적 거동을 온도에 따라 보여준 것이다. 열용량과 열확산도 모두 온도에 따라 점진적으로 증가하는 거동을 보여주고 있으며, 곡선적합을 할 경우 직선적 증가 거동이 아닌 온도에 따른 다항식으로 표현할 수 있음을 알 수 있다.

한편, Figure 2는 60U-20Pu-3Am-2Np-15Zr SFR 금속핵연료용 합금에 대한 열용량과 열확산도 측정값을 온도에 따라 보여주고 있다. 600℃ 이내 온도 영역에서 온도증가에 따라 점진적으로 증가하고 있다. 물론 열확산도의 경우에도 직선적 증가 거동이 아닌 온도에 따른 다항식으로 표현할 필요가 있다.

Figure. 3은 한국원자력연구원(KAERI)에서 개발중인 U-Zr 2원계 금속 연료심과 U-Zr-Ce 3원계 금속 연료심의 온도에 따른 선형 열팽창율의 변화를 보여주고 있다. 국내에서 Pu을 취급할 수 없으므로 Pu을 배제한 U-Zr 금속 핵연료 및 U-Zr-Ce 금속 핵연료를 제조하고 제조된 연료심에 대한 열적 특성을 분석하였다. 먼저 U-Zr 2원계 금속 연료심의 열팽창율의 경우 Figure. 3에서 보는 바와 같이, 온도증가에 따라 거시적으로는 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 비열 변화의 경우에서처럼 약 700℃ 근처에 이르러 열팽창율이 증가하는 방향으로 급격한 천이현상이 발생하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 금속 연료심의 해당 온도범위에서의 상변태에 기인하는 현상으로 볼 수 있다. 열팽창율은 약 600℃ 부근에서 연료심 조성에 따라 다르지만 대체적으로 0.5%~1.0% 범위의 값을 보여주었다.

3. 결론

본 논문에서는 소듐냉각고속로(SFR) 금속 핵연료용 합금의 열적특성, 즉 열용량, 열팽창율, 열확산도, 열전도도 등의 특성을 미국 INL 및 한국원자력연구원 실험결과를 살펴보았다. 금속핵연료의 열용량, 열팽창율, 열확산도, 열전도도 등은 온도증가에 따라 대체적으로 점진적으로 증가하는 거동을 보여주었다. 금속핵연료의 경우 이러한 열적

특성이 매우 중요함에도 불구하고 이용 가능한 실험자료가 매우 제한되어 있는 실정이다. 특히, 국내의 경우 Pu을 취급할 수 없으므로 Pu을 배제한 U-Zr 금속 핵연료 및 U-Zr-Ce 금속 핵연료를 제조법을 개발하고 이러한 금속연료심에 대한 열적 특성을 평가중에 있다. 이런 이유로 제한된 열적 특성 관련 외국 실험자료와의 직접적인 비교에 어려움이 있으나 한정된 실험자료를 활용하여 국내 SFR용 금속핵연료의 열적특성 실험자료의 보완에 활용하며, 지속적인 열적 특성 DB를 생산 중에 있다.

4. 참고문헌

[1] D. C. Crawford *et al.*, "Fuels for sodium-cooled fast reactor : US perspective", *Journal of Nuclear Materials*, 371, (2007).

[2] J. Carmack *et al.*, "Advanced Sodium Fast Reactor (SFR) Fuel Comparison", *GEN IV International Forum*, April, (2008).

[3] C. L. Trybus *et al.*, "Casting of metallic fuel containing minor actinide additions", *Journal of Nuclear Materials*, 204, (1993).

[4] S. L. Hayes *et al.*, "Metallic Fuels", *Nuclear Fuels Materials Spotlight*, Idaho National Laboratory, March, (2009).

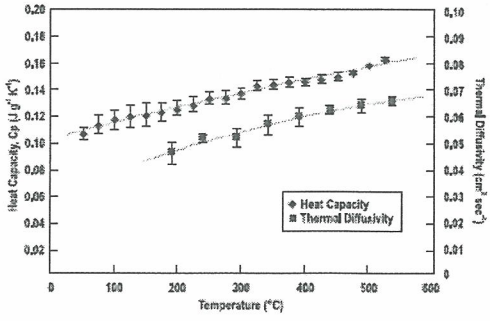


Fig. 1. Plots showing the temperature dependence of the heat capacity and thermal diffusivity measured for the 60U-20Pu-3Am-2Np-15Zr fuel alloy up to the first phase transition [4]

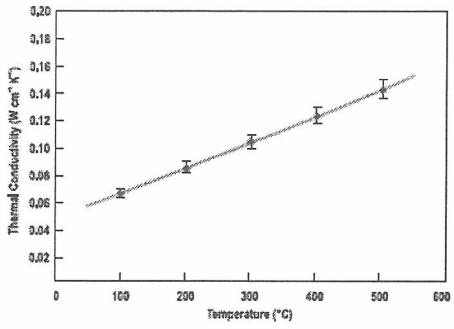
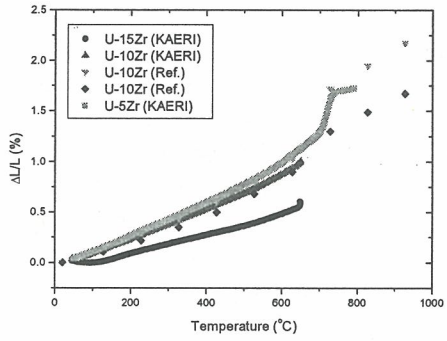
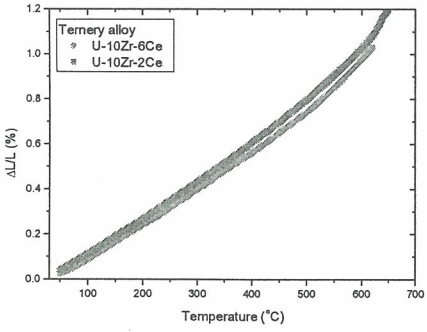


Fig. 2. Temperature dependence of the thermal conductivity determined from the fitted expressions for density, heat capacity, and thermal diffusivity from the 60U-20Pu-3Am-2Np-15Zr fuel alloy up to the first phase transition [4]



(a)



(b)

Fig. 3. Thermal expansions of U-Zr binary fuels and U-Zr-Ce ternary fuels with increasing temperature (a) U-Zr binary fuels, (b) U-Zr-Ce ternary fuels