

모의 금속연료의 압축 크리프 거동

나상호, 주윤정, 박창제, 강권호

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 1045

shna@kaeri.re.kr

1. 서론

일반적으로 우라늄 합금금속 연료는 세라믹 연료에 비해, 연료밀도가 높고, 열전도도도 우수한 장점이 있지만, 연료의 용융점이 낮으므로 냉각재 출구 온도를 높일 수 없어 원자로 효율의 저하 가능성이 있으며, 조사시키면 연료의 부피팽창이 크고, 피복관과의 공경(eutectic) 등의 단점으로 인하여 현행의 원자력연료의 중심에서 벗어나 있었다. 그러나 파이로프로세싱을 거친 금속연료는 기존의 고속증식로의 금속연료인 우라늄-플루토늄-지르코늄의 3원계 성분 외에 넵튬, 아메리슘, 퀴륨 등의 마이너 액티나이드와 희토류 성분이 기본적으로 함유되어 있어, 핵확산 저항성이 강한 새로운 연료주기로 각광을 받고 있다.

금속연료의 노내 사용온도는 전형적인 설계에서는 700 K~1200 K($T/T_m > 0.5$, T_m ; 용융점)으로, 이와 같은 고온에서는 가스에 의한 부피팽창(swelling) 외에 크리프 변형이 중요하다. 크리프 변형속도는 일정 하중을 크리프 시험시편에 걸고 장시간에 걸쳐 시험시편의 연신량을 직접 측정하여 구하는 것으로, 일반적으로 금속 시료인 경우에는 인장시험으로, 세라믹 시료인 경우에는 압축 시험을 많이 이용한다. 그러나 우라늄 금속인 경우, 수십 mm의 시험시편을 제조하는 것이 용이하지 않으며, 불활성 분위기의 조건에서도 장시간의 고온에서 유지하는 동안 현저한 산화가 예상되는 등의 제약조건으로 인해 압축시험이 사용되기도 한다.

여기에서는 모의 금속연료를 사용하여 기계적 물성의 하나인 크리프 거동을 조사하였다.

2. 본론

2.1 시편 준비 및 실험 방법

시편의 조성(wt%)은 96.9U-0.1Pd-1.1Nd-0.5Zr-1.4Ce이며, 시편은 원통형으로 직경은 8.6±0.4 mm, 길이는 10.5±0.3 mm이다. 희토류를 대표하는 Nd와 TRU의 아메리슘 대신에 Ce를 첨가하여

제조하였으며, 첨가함량은 55,000 MWd/tU 정도 연소시켰을 때를 모사한 함량이다. 크리프 시험은 압축시험으로 수행하였으며, Fig. 1에 개략적인 크리프 시험장치를 나타내었다. 아르곤(Ar) 가스 분위기 하에서 온도는 2 조건(873 K & 973 K), 응력은 15~150 MPa으로 변화시켜 크리프 변형속도를 구하였다. 순간변형을 제하고 크리프 변형량은 5%로 하였다.

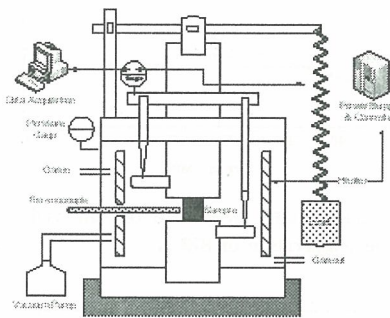


Fig. 1. Schematic diagram of creep apparatus

2.2 실험 결과

Fig. 2와 Fig. 3에 각각 온도 873 K와 973 K에서의 응력에 따른 시료(96.9U-0.1Pd-1.1Nd-0.5Zr-1.4Ce)의 크리프 변형속도를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 온도와 응력이 증가할수록 크리프 변형속도는 증가함을 보여준다. 다만 일정 응력 이상에서는 크리프 변형속도가 급격히 증가함을 보여준다. 천이응력의 경우, 온도가 증가할수록 감소하는 경향을 보여준다. 크리프 변형속도가 급격히 변하기 시작하는 응력을 천이응력, 이라 하며, 천이응력보다 작은 구간($\sigma < \sigma_t$)과 큰 구간($\sigma > \sigma_t$)에서 작용하는 메커니즘은 다르다.

Fig. 2의 온도 873 K에서 천이응력, σ_t 은 75.3 MPa로 나타났으며, 천이응력보다 작은 구간($\sigma < \sigma_t$)에서는 응력지수, n 이 1.71, 천이응력보다 큰 구간($\sigma > \sigma_t$)에서 응력지수, n 은 5.07로 나타났다.

또한 Fig. 3의 온도 973 K에서 천이응력, σ_I 은 30.2 MPa로 나타났으며, 천이응력보다 작은 구간 ($\sigma < \sigma_I$)에서는 응력지수, n 이 0.68, 천이응력보다 큰 구간 ($\sigma > \sigma_I$)에서 응력지수, n 은 4.61로 나타났다. 일반적으로 응력지수가 2보다 작은 값에서 작용하는 메커니즘은 일반적으로 확산 크리프가, 그리고 응력지수가 4~5인 값에서는 전위상승 크리프가 유효속기구인 것으로 보고되고 있다. 결과적으로 천이응력 미만의 응력 구간에서의 크리프 유효속 메커니즘은 확산 크리프가, 그리고 천이응력보다 큰 응력 구간에서의 크리프 유효속 메커니즘은 전위상승에 의한 크리프인 것으로 사료되었다.

경향을 보여주었다.

- 천이응력보다 작은 응력구간에서의 유효속 메커니즘은 확산 크리프가, 천이응력보다 큰 응력구간에서는 전위상승이 유효속 메커니즘으로 나타났다.

4. 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 원자력중장기과제의 일환으로 수행되었습니다.

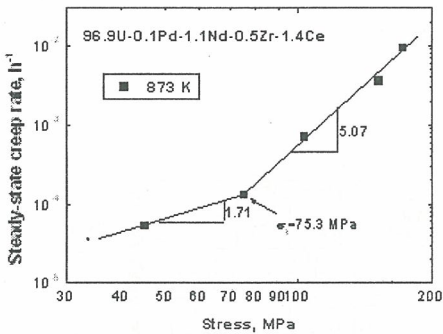


Fig. 2. Steady-state creep rate of sim fuel at the temperature of 873 K

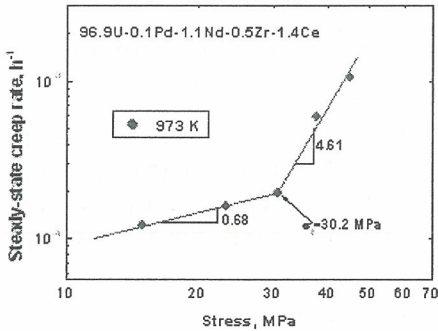


Fig. 3. Steady-state creep rate of sim fuel at the temperature of 973 K

3. 결론

모의 금속연료를 제조하여 온도 및 응력에 따른 크리프 변형거동을 압축시험으로 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 시험온도가 증가할수록 천이응력은 감소하는